



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

MOŽNOSTI UPLATNĚNÍ LEHKÝCH AUTOKLÁVOVANÝCH MATERIÁLŮ NA SILIKÁTOVÉ BÁZI PŘI ZATEPLOVÁNÍ STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

POSSIBILITIES OF UTILIZING LIGHTWEIGHT AUTOCLAVED SILICATE BASED MATERIALS FOR
INSULATION OF BUILDING STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB NOVÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ ZACH, Ph.D.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Jakub Novák

Název Možnosti uplatnění lehkých autoklávovaných materiálů na silikátové bázi při zateplování stavebních konstrukcí

Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Zach, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2015

Datum odevzdání bakalářské práce 27. 5. 2016

V Brně dne 30. 11. 2015

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [1] VAVERKA, J.; KOZEL, V.; LÁDYŠ, L.; LIBERKO, M.; CHYBÍK, J. Stavební fyzika 1, urbanistická stavební a prostorová akustika. 1. vyd. Brno: VUTUM, 1998. 343 s. ISBN 80-214-1283-6.
- [2] HALAHYJA, M.; CHMÚRNÝ, I.; STERNOVÁ, Z. Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 1998. 253 s. ISBN 80-88905-04-4.
- [3] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J. Zkoušení izolačních materiálů. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 95 s. ISBN 80-214-2253-X.
- [4] Rajchot V., Vývoj tepelně izolačních a sanačních omítek pro památkovou péči, Diplomová práce, FAST VUT, 2013 Brno
- [5] Matoušek, M., Lehké stavební látky II, SNTL, Praha 1985

Zásady pro vypracování

Cílem práce je zmapování současných poznatků v oblasti vývoje a využití lehkých autoklávovaných materiálů na silikátové bázi při zateplování i sanaci stavebních konstrukcí. Předmětem práce budou především materiály o nízké objemové hmotnosti nižší než 200 kg.m^{-3} . V rámci práce bude provedena podrobná rešerše odborné vědecké literatury, a také průzkum stavebního trhu. V teoretické části práce bude provedeno zhodnocení možností uplatnění těchto materiálů na stavebním trhu (jak z pohledu současného stavu, tak i s výhledem do budoucna) a bude proveden teoretický návrh nového izolačního materiálu na silikátové bázi uplatnitelného při zateplování stavebních konstrukcí, který by byl výrobitelný v rámci dostupných výrobních technologií v ČR.

V rámci praktické části práce bude provedeno praktické ověření provedeného návrhu, které bude spočívat v laboratorní nebo poloprovozní výrobě zkušebních vzorků a ve stanovení jejich základních fyzikálních a mechanických vlastností.

Struktura bakalářské práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).
- 3.

.....

Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Bakalářská práce se věnuje problematice zateplování stavebních konstrukcí s využitím pórobetonu na silikátové bázi s objemovou hmotností do 200 kg/m^3 . V teoretické části jsou zpracovány poznatky o tepelné ochraně budov a tepelně-izolačních materiálech. Následně jsou rozděleny zateplovací systémy. Podrobně je popsána výroba pórobetonu a jeho vlastnosti. V bakalářské práci byly zhodnoceny možnosti uplatnění materiálu. Ten se ukázal jako vhodný například pro výrobu izolačních předstěn, izolací základových desek nebo kompozitních obvodových panelů.

V praktické části byly zjišťovány hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností výrobku z pórobetonu. Výsledky zkoušek ukázaly, že lze výrobek použít jako alternativu ke standardním zateplovacím systémům. Součástí praktické části pak bylo také porovnání nejrozličnějších zateplovacích materiálů na současném trhu.

V závěru práce je poté provedeno celkové zhodnocení, které zahrnuje celkové poznatky a zjištěné výsledky.

Klíčová slova

Tepelně-izolační materiály, pórobeton, izolační předstěna, součinitel tepelné vodivosti, objemová hmotnost, tobermorit, vlhkost

Abstract

This bachelor's thesis deals with the issue of thermal insulation for building structures using autoclaved aerated concrete on silicate based with density up to 200 kg/m^3 . The theoretical part presents the knowledge of the thermal protection of buildings and thermal insulation materials. Thereafter are distributed insulation systems. Production of aerated concrete and its properties is described in detail. In thesis were evaluated possibilities of use this material. The material is proved to be suitable for the production of thermal insulating wall, insulated foundation slabs or composite external panels.

In the practical part were find out the values of physical and mechanical properties of aerated concrete product. Test results showed that the product can be used as an alternative to standard insulation systems. Component of the practical part was also to compare various insulation materials on the present market.

In the conclusion is performed an overall assessment that includes the overall findings and the results.

Keywords

Thermal-insulating materials, autoclaved aerated concrete, thermal-insulating wall, coefficient of thermal conductivity, volume weight, tobermorite, moisture

Bibliografická citace VŠKP

Jakub Novák *Možnosti uplatnění lehkých autoklávovaných materiálů na silikátové bázi při zateplování stavebních konstrukcí*. Brno, 2016. 64 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Jiří Zach, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2016

.....
podpis autora

Jakub Novák

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Zachovi, Ph.D. za jeho ochotu, vstřícnost a množství podnětných informací, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout. Dále patří velký dík hlavnímu technologovi závodu Xella CZ, s.r.o. Hrušovany u Brna Ing. Zdeňku Ovečkovi za poskytnutí rad a informací.

OBSAH

A. ÚVOD	10
B. TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1. Tepelná ochrana budov a energetická náročnost.....	11
1.1 Energetická náročnost výroby pórobetonu	12
1.2 Legislativa	12
1.3 Požadavky na konstrukce z hlediska tepelné ochrany.....	12
2. Tepelně-izolační materiály pro stavební účely.....	14
3. Zateplování stavebních konstrukcí (zateplovací systémy).....	15
3.1 Vnější zateplení	15
3.2 Vnitřní zateplení	16
4. Autoklávovaný pórobeton na silikátové bázi	16
4.1 Technologie výroby CALSILOX	17
4.1.1 Suroviny pro výrobu pískového pórobetonu	17
4.2 Tvorba struktury pórobetonu	19
4.2.1 Tuhnutí a nakypřování	19
4.2.2 Hydrotermální reakce	19
4.3 Mechanicko-fyzikální vlastnosti pórobetonu	20
4.3.1 Pevnost v tlaku	21
4.3.2 Objemová hmotnost	21
4.3.3 Tepelná vodivost	21
5. Teoretický návrh výrobku z pórobetonu s lepšími tepelně-izolačními vlastnostmi.....	23
5.1 Výroba	24
6. Možnosti uplatnění lehkého autoklávovaného materiálu na silikátové bázi při zateplování budov	24
6.1 Izolační předstěny.....	25
6.1.1 Samonosná vnější izolace.....	25
6.1.2 Fasádní systém s ventilačními kanály	26
6.1.3 Odvětrávaný fasádní systém s otevřeným pláštěm	27
6.2 Kompozitní UHPC-AAC fasádní prvky s modifikovanou vnitřní omítkou u novostaveb i rekonstrukcí.....	28
6.3 Výplňové zdivo skeletů	32

6.3.1	Zavěšený stěnový systém	32
6.4	Jádrová výplň prefabrikovaných stropních dílců.....	33
6.5	Součást konstrukce podlah	34
6.6	Zateplení základové desky či vnější zateplení suterénu	34
C.	PRAKTICKÁ ČÁST	36
7.	METODIKA PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	36
8.	PRŮZKUM TRHU	37
9.	PŘÍPRAVA A OZNAČENÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	38
10.	POPIS PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK	38
10.1	Stanovení objemové hmotnosti (ČSN EN 678)	38
10.2	Stanovení pevnosti v tlaku (ČSN EN 679)	39
10.3	Stanovení součinitele tepelné vodivosti (ČSN EN 12 667)	40
10.4	Stanovení krátkodobé nasákavosti při úplném ponoření (ČSN EN 772-11)	42
10.5	Stanovení koeficientu kapilární absorpce (ČSN EN 1015-18)	42
10.6	Stanovení sorpční vlhkosti	43
10.7	Zkouška tahové pevnosti podkladové vrstvy (ČSN 73 2577).....	44
11.	VÝSLEDKY ZKOUŠEK A DISKUZE.....	45
11.1	Vyhodnocení základních charakteristik	45
11.2	Součinitel tepelné vodivosti	47
11.3	Vyhodnocení celkové krátkodobé nasákavosti	50
11.4	Vyhodnocení koeficientu kapilární absorpce.....	51
11.5	Vyhodnocení rovnovážné sorpční vlhkosti.....	52
11.6	Vyhodnocení tahové pevnosti podkladové vrstvy	53
D.	ZÁVĚR.....	55
E.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	58
F.	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	61
G.	SEZNAM GRAFŮ	62
H.	SEZNAM TABULEK.....	63
I.	POUŽITÉ ZKRATKY	64

A. ÚVOD

Stavebnictví a konkrétně tepelně-izolační materiály jsou ovlivněny poměrem cena/kvalita. Výrobci jsou nuceni produkovat výrobky, které splňují současné požadavky, mají výborné vlastnosti, ale zároveň jsou levnější než konkurence. Spektrum funkcí, které současné stavební materiály vykazují, je velice rozsáhlé. Díky tomu může investor vybírat z velkého množství materiálů. Odvětví stavebních hmot a dílců požaduje, aby tepelně-izolační materiál vykazoval nízkou tepelnou vodivost, mechanickou odolnost, trvanlivost a v neposlední řadě ekologičnost. Globálním trendem je snížit náklady na výrobu, produkovanou energii a odpady z výroby. Tato bakalářská práce se zaměřuje konkrétně na pórobeton. Tento stavební materiál, který se dá považovat za relativně mladý, získává oblibu zejména díky nízké objemové hmotnosti a s ní související nízkou tepelnou vodivostí. Sortiment obsahuje produkty pro nejrůznější aplikace v nosných konstrukcích, schodištích, výplňových zděvech i tepelně-izolačních prvcích. Výhodou tohoto materiálu je jeho snadná opracovatelnost, manipulace při aplikaci a jeho prvková kompatibilita. Proto je vhodný jak pro občanskou výstavbu, tak i pro průmyslovou.

Hlavní charakteristikou pórobetonu je jeho pórovitá struktura. Ta vzniká reakcí hliníkového prášku s hydroxidem vápenatým, při níž uniká vodík a tvoří tak v hmotě póry. Právě póry jsou nositeli tepelně-izolačních vlastností, jelikož je v nich uzavřen izolující vzduch. Výrobky z pórobetonu, používané pro izolace (objemová hmotnost do 200 kg/m^3), obsahují přes 85 % pórů. Tyto výborné vlastnosti však omezují jeho použití ve více namáhaných konstrukcích, protože s vyšší pórovitostí klesá pevnost v tlaku.

Tato bakalářská práce vznikla ve spolupráci se společností Xella CZ, s.r.o.

B. TEORETICKÁ ČÁST

1. Tepelná ochrana budov a energetická náročnost

Účelem stavby je zajištění ochrany člověka před vnějšími klimatickými vlivy a vytvoření optimálního vnitřního prostředí pro pobyt a práci jejího uživatele. Dle posledního sčítání lidu z roku 2011 se na území ČR nachází přibližně 1 800 000 obydlených domů a jejich průměrné stáří dosahuje hodnoty 49 let [1]. Obzvláště domy postavené před rokem 1980 nevyhovují současným standardům a legislativním požadavkům. Nyní je zaznamenáván vzestup nové výstavby rodinných a bytových domů, avšak nesmíme zapomínat na revitalizace či opravy těch původních.

Výstavba a vlastní provoz budovy jsou spojeny se spotřebou energie. Snaha o její hospodárné využití a minimalizaci energetických nároků s ohledem na vložené investiční náklady vede k potřebám přesnějšího vyčíslení a posouzení variant řešení stavebně-energetické koncepce.

Výroba v současné době používaných tepelně-izolačních materiálů je poměrně náročná, pokud jde o spotřebu energie, surovin a nákladů. Proto existují snahy o nalezení alternativních dostupných materiálních zdrojů. Místní, snadno obnovitelné zdroje se zdají být výhodnou alternativou nezasahujícího do životního prostředí, pod podmínkou následného zpracování s nízkou energetickou náročností. To je také v souladu s legislativním balíčkem "20-20-20" odsouhlaseného Evropským parlamentem a Radou v roce 2008, legalizovaným v červnu 2009. Snadno obnovitelné materiální zdroje jsou velmi důležité také z hlediska udržitelnosti materiálních zdrojů [2].

Další požadavky stanovuje Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU ze dne 19. května 2010 o energetické náročnosti budov, která kvůli novým podstatným změnám nahrazuje směrnicí 2002/91/ES ze dne 16. prosince 2002. V sektoru budov se spotřebuje více než 40% celkové energie v Evropské unii, která je srovnatelná se situací v odvětví dopravy a více než dvakrát vyšší než v průmyslovém sektoru. Výrobci se snaží přizpůsobit výrobu a samotné výrobky novým předpisům. Samotná výroba různých materiálů produkuje obrovské množství CO₂ a další skleníkové plyny, které ohrožují celou planetu. Proto je kladen důraz na co nejšetrnější výrobu [2].

Spolu se zvýšeným využíváním energie z obnovitelných zdrojů by opatření přijatá za účelem snížení spotřeby energie v Unii umožnila Unii dodržení závazku splnění Kjótského protokolu k Rámcové úmluvě Organizace spojených národů o změně klimatu (UNFCCC), dlouhodobého závazku zachovat nárůst globální teploty pod 2 °C i závazku snížit do roku 2020 celkové emise skleníkových plynů alespoň o 20 % ve srovnání s hodnotami z roku 1990 a v případě mezinárodní dohody o 30 %. Snížená spotřeba energie a zvýšené využívání energie z obnovitelných zdrojů také hrají důležitou úlohu při podpoře zabezpečování zásobování energií, technologického vývoje a při vytváření příležitostí k zaměstnání a regionálního rozvoje, zejména ve venkovských oblastech.

Opatření k dalšímu snižování energetické náročnosti budov by měla brát v úvahu klimatické a místní podmínky i mikroklima vnitřního prostředí a efektivnost nákladů. Tato opatření by

neměla být v rozporu s jinými požadavky týkajícími se budov, např. požadavky na přístupnost, bezpečnost a plánované využití budovy [4].

1.1 Energetická náročnost výroby pórobetonu

Výrobní pórobetonu (pórobeton dále jen AAC) se snaží minimalizovat odpady z výroby. Při řezání čerstvé hmoty na kráječky vznikají zbytky, které se nazývají přerost, a ty se poté rozplavují ve vodě. Tato směs se nazývá přerostový kal. Celá tato směs se vrací zpět do výroby. AAC je obecně považován za materiál šetrný k životnímu prostředí. Důvodem je, že hlavní složky AAC jsou křemičitý písek, vápno, cement a voda. Výroba je téměř bezodpadová a neníčí životní prostředí. Pórobeton díky příznivé surovinové bilanci šetří suroviny: z 1 m³ suroviny se vyrobí cca 5 m³ pórobetonu. Ten je pak vyráběn v uzavřeném cyklu, který vyžaduje menší spotřebu energie, než výroba jiných srovnatelných stavebních materiálů. Výrobní závody se snaží o maximálně energeticky úspornou výrobu. Například vodní pára potřebná pro vytvrzení se až z 85 % použije vícekrát. Další zbývající energie z tohoto procesu je využita na vytápění [4].

1.2 Legislativa

Úspora energie a tepelná ochrana patří k základním požadavkům na stavby, které jsou stanoveny § 8 vyhlášky č. 268/2009 Sb. ve znění pozdějších předpisů [5]. Související legislativou je v tomto případě zákon č. 406/2000 Sb. ve znění pozdějších předpisů, o hospodaření s energií [6], a vyhláška č. 148/2007 Sb. ve znění pozdějších předpisů, o energetické náročnosti budov [7]. K tepelně technickým požadavkům na stavby se vztahují také § 10 odst. 1 písm. h) a § 10 odst. 1 písm. i) vyhlášky č. 268/2009 Sb. ve znění pozdějších předpisů [5], které se týkají výskytu vlhkosti ve stavebních konstrukcích nebo na povrchu stavebních konstrukcí uvnitř staveb a nedostatečných tepelně izolačních vlastností. Dále je úspora energie a ochrana tepla obecně popsána v § 16 vyhlášky [5].

1.3 Požadavky na konstrukce z hlediska tepelné ochrany

Dle ČSN 73 0540 „Tepelná ochrana budov“, jsou stanoveny tepelně-technické požadavky pro navrhování a ověřování budov s požadovaným stavem vnitřního prostředí při jejich užívání. Požadavky zajišťují zejména splnění úspory energie a tepelnou ochranu budov a také zajišťují ochranu zdraví a životního prostředí. Pro budovy památkově chráněné nebo stávající budovy uvnitř památkových rezervací platí norma přiměřená možnostem, ale nesmí docházet k poruchám a vadám při jejich užívání [8]. Dle normy ČSN 73 0540-2 „Tepelná ochrana budov-část 2: Požadavky“, jsou stanoveny podmínky v oblasti [8]:

- šíření tepla konstrukcí a obálkou budovy
 - nejnižší vnitřní povrchová teplota konstrukce
 - součinitel prostupu tepla
 - průměrný součinitel prostupu tepla
 - lineární a bodový činitel prostupu tepla
 - pokles dotykové teploty podlahy

- šíření vlhkosti konstrukcí
 - zkondenzovaná vodní pára uvnitř konstrukce
 - roční bilance kondenzace a vypařování vodní páry uvnitř konstrukce
- šíření vzduchu konstrukcí a budovou
 - průvzdušnost
 - větrání místností
- tepelná stabilita místností
 - pokles výsledné teploty v místnosti v zimním období
 - tepelná stabilita místnosti v letním období.

Při provozu objektu je velmi důležité, abychom dosáhli co největších energetických úspor, a tím chránili životní prostředí. Vztah mezi snižováním produkce CO₂ a energeticky efektivním návrhem tepelně-technických vlastností objektu je velmi významný [9]. Pro památkově chráněné budovy nebo stávající budovy uvnitř památkových rezervací je přiměřeně snížena platnost této normy, vzhledem k potřebě chránit kulturní dědictví [10].

Mezi základní funkční požadavky z hlediska tepelné ochrany budov dle normy ČSN 73 0540 patří mimo jiné tepelný odpor a součinitel prostupu tepla.

• Tepelný odpor

R [(m²·K)/W] tepelně izolační vlastnost vrstvy materiálu, popř. nestejnorodé vrstvy materiálu, popř. stavební konstrukce dané tloušťky. Je-li známa hodnota součinitele tepelné vodivosti vrstvy materiálu a je-li konstantní, povrchy kolmé na směr tepelného toku jsou vzájemně rovnoběžné (planoparalelní vrstva) a vrstvou tak proudí rovnoměrný tepelný tok, je tepelný odpor definován vztahem:

$$R_T = R_{si} + \sum_i^j \left(\frac{d_j}{\lambda_j} \right) + R_{se}$$

Kde:

R_T je tepelný odpor konstrukce při prostupu tepla [(m²·K)/W]

R_{si} tepelný odpor při přestupu tepla z vnitřního prostředí do konstrukce [(m²·K)/W]

R_j tepelný odpor jednotlivých vrstev [(m²·K)/W]

d_j tloušťka vrstvy v konstrukci [m]

λ_j výpočtová tepelná vodivost materiálu stanovena v souladu s ČSN 75 0540-3 [W/(m·K)]

R_{se} tepelný odpor při přestupu tepla z konstrukce do vnějšího prostředí [(m²·K)/W] [11].

Tepelný odpor se dále pak využívá při výpočtu součinitele prostupu tepla U .

- **Součinitel prostupu tepla**

Součinitel prostupu tepla U_T [$W/(m^2 \cdot K)$] je definován jako celková výměna tepla v ustáleném stavu mezi dvěma prostředími vzájemně oddělenými stavební konstrukcí o tepelném odporu R s přilehlými mezními vzduchovými vrstvami [12].

$$U_T = \frac{1}{R_T}$$

kde: R_T ... odpor konstrukce při prostupu tepla (u prostředí do prostředí) [$(m^2 \cdot K)/W$] [12]

2. Tepelně-izolační materiály pro stavební účely

Norma ČSN EN ISO 9229 „Tepelné izolace - Terminologie“ definuje tepelně izolační materiály jako materiály, které omezují prostup tepla, a jejichž izolační vlastnosti vyplývají z jejich chemického složení anebo fyzikální struktury. Tepelně izolační výrobek je dle ČSN 72 7221-1 „Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví - Část 1: Typy konstrukcí a kategorie použití“ výrobek z tepelně izolačního materiálu výrazně omezujícího šíření tepla, vykazujícího charakteristickou hodnotu součinitele tepelné vodivosti nižší než $\lambda_{k,max}=0,1 W/(m \cdot K)$. Při referenčních teplotních a vlhkostních podmínkách dle ČSN 73 0540-3 a daném stáří, má-li vliv na udávanou hodnotu.

Tepelné izolace svými vlastnostmi umožňují snížit energetické ztráty staveb a jejich použití se projevuje celkovou úsporou energie a snížením nákladů na vytápění, ohřev vody apod. [13]. Současný trh nabízí širokou škálu tepelně-izolačních materiálů na organické či anorganické bázi. Mnoho tepelně-izolačních materiálů využívá principu uzavření vzduchu do pórů nebo mezi vlákna, a tím zabrání jeho konvekci. Jelikož vzduch v pórech má výborné tepelně-izolační vlastnosti, pak se i samotný materiál vyznačuje těmito vlastnostmi. Tyto materiály proto velmi často vykazují relativně nízkou objemovou hmotnost, nízkou tepelnou vodivost a vysokou porozitu. Tepelná vodivost je přímo úměrná obsahu plynu (vzduchu) v materiálu, proto materiály na stejné bázi o nižší objemové hmotnosti (tedy vyšší porozitě) budou vykazovat nižší hodnoty tepelné vodivosti [14].

Tepelné izolace se dělí podle několika kritérií:

a) podle druhu základní hmoty:

- organické
- anorganické

b) podle struktury:

- vláknité
- pórovité (pěnové)
- zrnité

c) obsahu pojiva: pojivo obsahující, pojivo neobsahující

d) tvaru výrobku:

- volný (zásyp, vlna), plochý (deska, rohož, plst'), tvarový (skruže, segmenty), šňůrový (těsnící provazce)

e) požární bezpečnosti:

- požadavky na zateplovací systémy stavebních konstrukcí z hlediska požární bezpečnosti jsou dány především ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb, ČSN 73 0810 (a normami návaznými) a vyhláškou MMR č. 268/2009 Sb., o technických požadavcích na výstavby

f) dělení podle použitého materiálu:

- lehké silikátové výrobky – lehká kameniva a lehké betony
- pěnové anorganické hmoty nové anorganické hmoty – pěnové sklo nové sklo
- pěnové organické hmoty – pěnové plasty
- vláknité anorganické materiály – skleněná a minerální vlákna
- hmoty z organických materiálů – korek, dřevěná vlna, papír, sláma, ovčí vlna, technické konopí.

Aby se dosáhlo lepších užitných vlastností, často jsou izolace vyráběny kombinací materiálů [15].

Parametry a vlastnosti různých zástupců izolačních materiálů budou uvedeny v závislosti na uplatnění zkoumaného materiálu v praktické části, v kapitole průzkum trhu.

3. Zateplování stavebních konstrukcí (zateplovací systémy)

Zateplovací systémy jsou používány jako vnější plášť nových a rekonstruovaných staveb. Tvoří tak architektonický výjev budovy. Mezi jejich nejdůležitější výhody patří flexibilita při vývoji zajímavých estetických efektů, a to díky existenci četných alternativ izolačních materiálů, jakož i jejich potenciál vytvořit účinné vícevrstvé stavební prvky, a tím zajistit nezbytnou ochranu proti klimatickým vlivům. Přispívají také k tvorbě pohodlných vnitřních podmínek [16].

Pokud se ovšem zatepluje historická budova nebo objekt, kde není možno zasahovat do jeho vnějšího vzhledu, je nutno zateplit stěnu z vnitřní strany. Toto řešení je mírně komplikovanější a má své specifické požadavky.

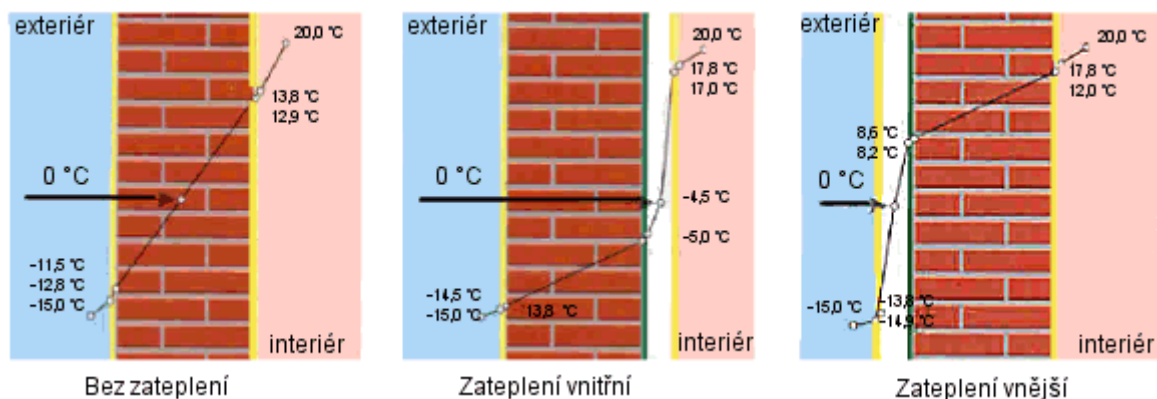
3.1 Vnější zateplení

Pokud aplikujeme izolaci na vnější stranu zdiva, tak se teplota $\theta = 0\text{ °C}$ posune z nosné konstrukce do tepelné izolace. Tím se zabrání promrzání konstrukce, která je díky tomu v průběhu celého roku téměř v konstantních podmínkách. Životnost nosné konstrukce se tak zvyšuje a s výhodou se využije i dobré akumulace zdiva. Tyto konstrukce však mohou být rizikové z hlediska difúze vodní páry. Abychom toto riziko snížili, je nutno věnovat pozornost

správnému řazení jednotlivých vrstev a umístit vrstvy s vyšším difúzním odporem na vnitřní stranu konstrukce. Obzvláště nebezpečné jsou vnější tenkovrstvé omítky s vysokým difúzním odporem. Z tohoto hlediska jsou mnohem bezpečnější konstrukce dvouplášťové větrané. Každou obvodovou konstrukci je nutno doložit tepelně technickým výpočtem a dosáhnout příznivého průběhu teplotního a vlhkostního režimu. Při správné volbě druhu a tloušťky tepelné izolace v souladu s požadavky ČSN 73 0540-2 lze zajistit optimální tepelný komfort bydlení při současné úspoře energie na vytápění. U zateplení z vnější strany se vyloučí tepelné mosty v místě stropů a při izolaci sklepného a půdního zdiva se dosáhne zlepšení teplotních podmínek na půdě a ve sklepech. Slabým článkem obvodového pláště jsou okna [16].

3.2 Vnitřní zateplení

Volbou druhu a správné tloušťky tepelné izolace lze zabezpečit potřebný součinitel prostupu tepla v souladu s ČSN 73 0540-2. Z hlediska promrzání nosné části konstrukce je situace podstatně horší než v předchozím případě, protože teplota $\theta = 0^\circ\text{C}$ je posunuta až do vnitřní tepelné izolace. Obvodová konstrukce je tak vystavena výkyvům teplot v zimním a letním období, kdy při extrémech může být rozdíl až $\Delta\theta_t = 70^\circ\text{C}$. Díky extrémním vlivům povětrnosti je životnost konstrukce výrazně snížena. U těchto konstrukcí je nutno upozornit také na tepelnou akumulaci. Běžně používané tepelné izolace (pěnový polystyrén a minerální vata) mají nízkou tepelnou akumulaci, která sice umožňuje rychlé vytopení místnosti, ale po přerušení vytápění teplota rychle klesá. Je tedy nutné nepřerušované vytápění. Zateplení z vnitřní strany lze uplatnit ve stavbách, kde relativní vlhkost vzduchu dosahuje hodnot do 60 %, nebo tam, kde není z nějakého důvodu možno zateplit objekt z vnější strany [16].



Obrázek 1: Průběh teplot v konstrukci [16]

4. Autoklávovaný pórobeton na silikátové bázi

Pórobeton je velmi progresivním lehkým stavebním materiálem. Příznivé vlastnosti (např. poměr mezi mechanickými pevnostmi a objemovou hmotností nebo nízký součinitel tepelné vodivosti) posouvají tento materiál do popředí na trhu. Výrobky z pórobetonu se uplatní ve většině konstrukcí občanské, zemědělské i průmyslové výstavby.

První zmínky o pórobetonu se objevují v roce 1924 ve Švédsku a jsou spojovány se jménem Dr. A. Ericsona. Na našem území se objevuje výroba v Plaveckém čtvrtku (1958) a ve větší míře v Zemianských Kostolanech (1959). Výroba vycházela z polské technologie UNIPOL a později z technologie firmy SIPOREX, která u nás vyráběla jako první pískový pórobeton na cementové bázi.

Nyní se v ČR vyrábí dva typy pórobetonů. Popílkový je vyráběn technologií UNIPOL a pískový využívá technologie CALSILOX. Tato práce je zaměřena na pískový pórobeton, ze kterého jsou vyrobeny zkoumané vzorky [17].

4.1 Technologie výroby CALSILOX

Křemičitý písek se velmi jemně mele, mísí a homogenizuje s nehašeným vápnem, cementem a s dalšími přísadami. Následně se ke směsi přidává plynotvorná látka, voda a přerostový kal. Vše se ve speciálních míchačkách smísí a vlévá do forem. Nezbytná je také vibrace ponornými vibrátory. Ty během krátké chvíle zajistí rovnoměrné zaplnění formy.

V dalším kroku putují formy na zrací pole, kde směs tuhne (tzv. zraje). Doba zrání se pohybuje kolem 3 hodin. Celé zrací pole snímá kamera a zaměstnanec ve velině sleduje tzv. dobu varu, kdy začne plynotvorná látka unikat na povrch. Pokud by bylo zrání kratší, nedošlo by k nedostatečnému nakypření. Naopak když by unikání plynotvorné látky bylo příliš intenzivní a delší, vznikaly by kapilární póry a trhlinky, zejména u povrchu. Ze zracího pole vyjede forma k jeřábu, který odformovaný blok zatuhlého pórobetonu přenesení na lamely, rošty či bočnice. Ty jsou pak posunovány směrem ke krájecímu zařízení. Nejdříve se seřízne přerost, který putuje do kalu a je znovu použit ve výrobě. Krájí se dráty, a to příčně a podélně. Již nakrájená hmota se následně autoklávuje.

Celý proces probíhá ve velkých tlakových nádobách, nazývané autoklávy. Zde se hmota vytvrdí v prostředí nasycené vodní páry za zvýšeného tlaku a teploty. Pevnost pórobetonu je způsobená hydrotermálními reakcemi.

Po autoklávování jsou hotové výrobky uloženy na palety. Následně jsou podrobeny optické kontrole, kdy se vyřadí poškozené kusy. Neporušené výrobky jsou poté zabaleny do fólií, na které je vytištěna třída a datum balení. Takto připravené bloky jsou expedovány nebo uloženy ve skladu. Problémem při expedici bývá zvýšená vlhkost, která dosahuje hodnot až 40 %, a tím se zvýší objemová hmotnost. Proto se doporučuje hrubou stavbu z pórobetonových tvárnic nechat tzv. vymrznout přes zimní období. Po vysušení zůstane v pórech pouze tepelně izolující vzduch [17][18].

4.1.1 Suroviny pro výrobu pískového pórobetonu

Pro výrobu pórobetonu se vyrábí 4 základní suroviny, ke kterým se přidává voda:

- a) **maltoviny** – vápno a cement – určují druh pórobetonu
- b) **křemičité látky** – křemičitý písek
- c) **plynotvorné látky** – Al prášek

- d) **pomocné suroviny** – usnadňující technologický proces výroby nebo zlepšující některé vlastnosti výrobků. Především jsou to látky regulující hašení vápna případně průběh tuhnutí maltovin, intenzifikující plynotvorné reakce nebo stabilizující pěny, podporující vznik tixotropní struktury, zabraňující sedimentaci, zlepšující vlastnosti (vlhkost, pevnost, nasákavost, apod.). Přidávají se v malém množství [18].

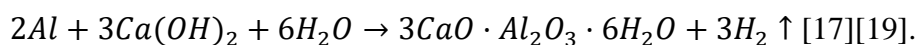
Pálené vápno (ČSN EN 459-2 Vápno pro výrobu pórobetonů) se používá jako základní maltovina. Nesmí obsahovat přepal a musí mít stejnorodé chemické i mineralogické složení. Musí být měkce až středně tvrdě pálené. Jeho celková alkalita ve vyžíhaném stavu musí být vyšší než 90 %. Rychlost a teplota hašení musí být minimálně 60 °C v mezích 4-12 min a ztráta žíháním se má pohybovat mezi 3-6 % [17].

Cement (ČSN EN 197-1 Cement - Část 1 - Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití) se do pórobetonů přidává hlavně pro rychlejší získání manipulační pevnosti. Používají se cementy na bázi portlandského slínku. Obecně platí, že složení cementu musí být konstantní, protože jinak by se muselo množství různých přísad regulujících jeho vlastnosti stále měnit. V praxi se používají cementy CEM I 42,5 R a CEM I 52,5 R [17][19].

Křemičité látky pro výrobu pískových pórobetonů se používají váté písky a jednak písky odpadajících při plavení kaolinu. Písek má být čistý s obsahem SiO₂ nad 90 %, jemně mletý (měrný povrch alespoň 200 m²·kg⁻¹), čímž se zintenzivní hydrotermální reakce. Obsah síry by neměl přesahovat 1 % a obsah alkálií by neměl být větší než 1,5 %. Písek se musí před vstupem do mlýna vysoušet [17][18]

Jako **plynotvorná látka** je nejčastěji používán hliníkový prach. Měrný povrch prachu by měl být 700-1200 m²·kg⁻¹. Plynotvorné látky tvoří plyn reakcí ve vhodném prostředí. Konkrétně hliníkový prach reaguje s Ca(OH)₂ za vzniku vodíku. Unikající plyn (například právě vodík) nakypřuje směs.

Reakce pro vznik vodíku:



Dále se používá například **energósádrovec**, který reguluje časový průběh tuhnutí autoklávovaných betonů. V případě, kdy je potřeba urychlit tuhnutí cementu, je přidáván **chlorid vápenatý**. Ten se používá jen u pórobetonů bez ocelové výztuže, protože obecně chloridy urychlují degradaci kovů. Méně časté je používání **hydroxidu sodného**, který způsobuje větší zalkalizování směsi, což podporuje vznik vodíku.

Přerostový kal se získává rozplavením odřezků ve vodě. Využití kalu umožňuje bezodpadovou technologii výroby

Tenzidy se používají k odmašťování hliníkového prášku a rovněž jako stabilizátory při výrobě autoklávovaného pórobetonu.

Voda se používá užitková přehřátá na 30 – 60 °C. Platí pro ni podmínky jako pro záměsovou vodu do betonu (ČSN EN 1008 Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu). Používá se i silně alkalické kondenzáty z autoklávování [19][20].

4.2 Tvorba struktury pórobetonu

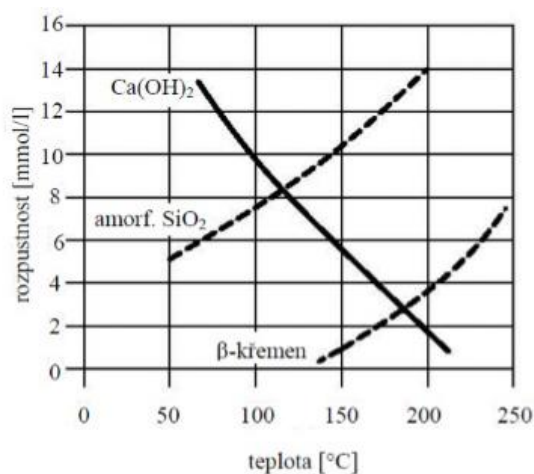
4.2.1 Tuhnutí a nakypřování

Během tuhnutí hmoty se odehrávají důležité procesy nakypřování a počáteční vytváření základní mikrostruktury. Vše musí být dokonale sladěno, především průběh vývinu plynu s konzistencí směsi a jejím počátečním tuhnutím. Důležitým faktorem je také teplota vody. Při tuhnutí se projevují tixotropní jevy. Tuhnutí je výsledkem přitažlivých Van der Waalsových sil a odpuzivých elektrostatických sil mezi tuhými částicemi maltovin, hydratačních zplodin a výplní. Vznik tixotropní struktury podporuje přítomnost elektrolytu a vhodný tvar přítomných mikročástic. Tixotropní struktura se ruší vibrací, otřesy, nárazy apod., proto musí formy zůstat v klidu [21].

Reakce vodíku s hydroxidem vápenatým byla již zmíněna v kapitole „Suroviny pro výrobu pórobetonu“.

4.2.2 Hydrotermální reakce

Důležitou fází při výrobě pórobetonu je hydrotermální zpracování neboli autoklávování. Vytvářející pevnost hmoty souvisí se vznikem různých kalciumhydrosilikátů. Křemičitý písek, který by za normálního zrání zastával funkci plniva, vstupuje do chemické reakce. Parametry autoklávování nám určuje rozpustnost jednotlivých látek, neboť hydrotermální syntéza probíhá výhradně přes tekutou fázi. Obr. 1 ukazuje křivky rozpustnosti jednotlivých prvků. Optimální teploty při autoklávování dosáhneme v průsečíku křivek rozpustnosti Ca(OH)_2 a β -křemene, což odpovídá hodnotám 174 - 193 °C [17][19].

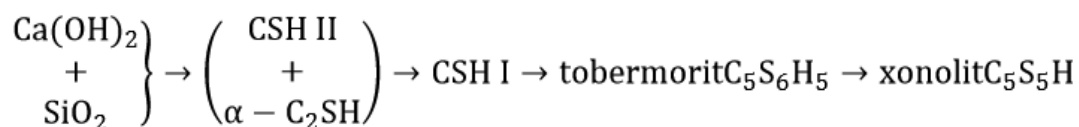


Obrázek 2: Rozpustnost Ca(OH)_2 , β -křemene a amorfního SiO_2 ve vodě [18]

Jak bylo uvedeno dříve, hydrotermální reakce probíhá v autoklávu v prostředí nasycené vodní páry při teplotě zpravidla 174 až 193 °C, což odpovídá tlaku 0,8 až 1,3 MPa. Průběh a výsledek hydrotermálních reakcí závisí na řadě okolností:

- a) chemický charakter výchozích látek (reaktivitě příslušného SiO_2)
- b) fyzikální struktura výchozích látek
- c) specifický povrch výchozích látek
- d) poměr $\text{CaO} : \text{SiO}_2$ ve výchozí surovinové směsi
- e) množství záměsové vody
- f) druh aditiv
- g) době trvání hydrotermální reakce

Za nositele pevnosti pórobetonu je označován tobermorit. Tvoří zpravidla destičkové resp. lístečkovité nebo laťkovité krystalky cca 1 μm veliké s poměrem $\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 0,8$ až $1,0 : 1$. Chemický vzorec tobermoritu je $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$. Při hydrotermální reakci se tvoří nejprve CSH II a určité množství C_2SH , kdy je omezený reaktivní povrch křemičitého materiálu a relativní nadbytek CaO . Ty se pak dále přemění se zbylou nezreagovanou křemičitou surovinou na CSH I, který má nižší obsah CaO . Dalším autoklávováním, nejdříve po 3 až 9 hodinách, vzniká tobermorit [17].



Obrázek 3: Rovnice vzniku tobermoritu [18]

4.3 Mechanicko-fyzikální vlastnosti pórobetonu

Pórobeton je specifický materiál, který musí splňovat vlastnosti typické pro běžná staviva, ale také méně běžné vlastnosti.

Mezi nejdůležitější požadavky patří:

- a) dostatečné pevnosti, při nízké objemové hmotnosti
- b) velká tepelná izolačnost
- c) nízká navlhavost a trvalý obsah vlhkosti, malá nasákavost a rychlá vysychavost
- d) co největší objemová stálost
- e) co největší trvanlivost a odolnost proti požáru
- f) stálost všech vlastností, tj. stejnoměrná kvalita výrobku [17]

Materiál struktury pórobetonu se vyznačuje pevnou mikroporézní maticí a makropóry. Ty jsou tvořeny v důsledku expanze hmoty způsobené provzdušňováním a mikropóry se objevují ve stěnách mezi makropóry. Makropóry se uvažují o průměru větším než 60 μm .

Vlastnosti betonu, jako je pevnost, propustnost, difuze, smršťování a dotvarování úzce souvisí s jeho pórovitostí a rozdělení velikosti pórů. To znamená, že charakterizace struktury pórů je mimořádně důležitá, a o to více v případě pórobetonu, kde může být pórovitost vyšší než 85 %, v závislosti na typu výrobku. Pórovitost a velikost pórů v pórobetonu se značně mění v závislosti na složení a způsobu vytvrzování. Pokud je vysoký obsah makropórů, ztenčují se stěny mezi nimi a tím se snižuje podíl mikropórů [22].

Mezi základní charakteristiky u pórobetonů patří:

- a) zaručená minimální pevnost v tlaku
- b) zaručená maximální objemová hmotnost

Z toho vychází označování typu pórobetonu, uvedené na tomto příkladu:

P2-350 = minimální pevnost v tlaku je 2 MPa a maximální objemová hmotnost je 350 kg/m³.

Tyto vlastnosti se pak dávají do vzájemného poměru, který se nazývá **koeficient konstruktivnosti**.

4.3.1 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku udává hodnota jednoosého napětí, při kterém dochází k úplnému porušení vzorku. Pevnost v tlaku je jednou z nejdůležitějších vlastností sledovanou u stavebních hmot. V případě pórobetonu je tato vlastnost úměrná velikosti a množství pórů a pevnosti stěn mezi póry. Přímý vliv na pevnost má také kvalita, zpracování, měrný povrch a ideální poměr použitých výchozích surovin. Za konečnou pevnost je zodpovědný minerál 11Å Tobermorit, který vzniká při autoklávování v hydrotermálních podmínkách. Zkoušku pevnosti v tlaku charakterizuje norma ČSN EN 679. Jako zkušební vzorek se používá krychle o hraně 10 cm vysušená při 60 °C na vlhkost 4 – 8 % při působení napětí v kolmém směru na směr kynutí směsi. Díky procesu autoklávování nemá stáří vzorku vliv na pevnost. Přímý vliv na pevnost má vlhkost. Díky ní může dojít k poklesu pevnosti o 15 – 20 % [23][24]. V současné době se pevnostní třídy pórobetonů pohybují v hodnotách do 6 MPa.

4.3.2 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost má vliv na všechny ostatní fyzikální vlastnosti. Obecně lze říci, že nízká objemová hmotnost je pro tepelně-izolační materiály výhodná. Je dána zejména množstvím pórů v objemu výrobku. U běžného nosného pórobetonu se objemová hmotnost pohybuje mezi 300 až 700 kg/m³, a u izolačních tvárnic se hodnota blíží až k 100 kg/m³. Pojem objemová hmotnost zahrnuje hmotnost matrice včetně všech pórů. Tento parametr se stanovuje ve stavu vysušeném při (105±5) °C. Norma ČSN EN 678 uvádí, že chyba při stanovení hmotnosti zkušebního tělesa nesmí být větší, než 0,1 % jeho hmotnosti a chyba při stanovení objemu tělesa nesmí být větší, než 1 %. Zvýšením objemové hmotnosti dochází i ke zvýšené pevnosti v tlaku a tepelné vodivosti [17][24].

4.3.3 Tepelná vodivost

Jak již bylo zmíněno dříve, v současné době je kladen velký důraz na energie a zateplování, a proto je i u pórobetonu tepelná vodivost a s ní spojené parametry jedním z hlavních kritérií.

Je známo, že tepelná vodivost se rovnoměrně snižuje s objemovou hmotností, resp. se zvětšováním celkové pórovitosti při konstantní distribuci velikostí pórů. Při stejné objemové hmotnosti má lepší tepelné charakteristiky pórobeton s malými, rovnoměrně rozmístěnými póry. Hodnota součinitele při 6% vlhkosti pórobetonového výrobku určeného pro nosné účely dosahuje hodnot od 0,12 – 0,22 W/(m·K) a např. pro tepelně-izolační desky se udává 0,045 W/(m·K) [17][24].

Mezi další vlastnosti pórobetonů patří:

- **Vlhkost pórobetonu**

Vlhkost pórobetonu zhoršuje jeho vlastnosti. Čím vyšší je vlhkost pórobetonu, tím se snižuje pevnost v tlaku, zhoršují se tepelné izolační vlastnosti a zvyšuje se objemová hmotnost. Jak již bylo zmíněno výše, je nutno počítat s expediční vlhkostí, která dosahuje vysokých hodnot (30-40 %) v závislosti na časové prodlevě od balení a expedice.

- **Smrštění sušením**

Smrštění sušením dochází v důsledku ztráty adsorbované vody z materiálu a je významný v pórobetonu z důvodu jeho vysoké celkové pórovitosti (40-80%) a specifickým povrchem pórů (kolem 30 m²/g). Použití vápna, jako hlavní maltoviny, snižuje smršťování výrobku. Bylo zjištěno, že smrštění sušením pórobetonu je závislé spíše na fyzické struktuře gelu, než na jeho chemickém složení [22].

V pórobetonu existuje silná interakce mezi vodou, vodní párou a porézním systémem. Zde existují různé vlhkostní transportní mechanismy. V suchém stavu jsou póry prázdné a převažuje difuze vodní páry, zatímco při vyšší vlhkosti jsou póry zaplněny [22].

- **Navlhavost a vysychavost**

Navlhavostí se rozumí množství vody pohlcené z okolního vzduchu na základě sorpčních schopností. Navlhavost charakterizujeme hodnotami odvozenými ze sorpčních isoterem. Vysychavost je obrácenou vlastností, kdy se sleduje rychlost odcházení vlhkosti z konstrukce [18].

- **Nasákavost**

Je určena stupněm otevřené a spojitě pórovitosti. Vyjadřujeme ji v hmotnostních %. Nasákavost je dána objemem pórů, do kterých voda vnikla. U pórobetonů je rychlost nasákavosti menší, než sledujeme u plných pálených cihel, avšak dosahuje hodnot relativně vysokých, proto je vhodné opatřit obvodovou konstrukci ochranou před přímými povětrnostními vlivy [18].

- **Vzlínavost**

Vzlínavostí rozumíme vzestup vody v pórovité hmotě v důsledku kapilární elevace nad úroveň hladiny vody v okolí, jestliže s touto vodou přišla zkoušená látka do přímého styku. AAC se chovají lépe, než jiné stavební látky, jelikož kulovité póry přerušují kapiláry a zabraňují tak elevaci [18].

- **Sorpční vlhkost**

Pórobetony obsahují póry a kapiláry nejrůznějších velikostí od 2 nm po 2 mm. Přítomnost nejjemnějších pórů způsobuje, že při relativních vlhkostech prostředí, obzvláště nad 60 %, pórobetony více navlhají a podrží si v porovnání s jinými stavivý středně velikou trvalou vlhkost [18].

- **Faktor difúzního odporu**

Faktor difúzního odporu μ [-] představuje konstantu vymezující difúzi v konkrétní látce. Je to jedna ze základních charakteristik stavebních materiálů. Toto bezrozměrné číslo udává, kolikrát větší difúzní odpor klade určitá látka proti stejné tlusté vrstvě vzduchu o stejné teplotě [18]. Pak též můžeme říci, že čím menší je hodnota difúzního odporu, tím lépe materiál „dýchá“ a umožňuje vodní páře a plynům pohyb konstrukcí. U tepelně-izolační desky MULTIPOR můžeme udat hodnotu 3 a pro tepelně izolační tvárnici LAMBDA P2-300 výrobce uvádí hodnotu 5-10 [18].

- **Trvanlivost**

AAC se skládá hlavně z tobermoritu, který je mnohem stabilnější, než ostatní produkty, vytvořených v běžném betonu. Nicméně pórobeton má vysokou pórovitost, což umožňuje pronikání kapalin a plynů. To může vést k poškození matrice. Zmrazovací a rozmrazovací cykly mají vliv na pevnost, pokud AAC má stupeň nasycení 20-40 %. Při vyšším stupni nasycení se vzorek stává křehkým a vznikají trhliny. Karbonatace může mít vliv na zvýšení objemové hmotnosti, ale tento jev se u pórobetonu vyskytuje pouze výjimečně [22].

- **Třída reakce na oheň**

Třída reakce na oheň výrobku určuje, zda a jakým způsobem výrobek přispívá k šíření požáru, to znamená, jak rychle hoří a kolik energie při tom vytváří. Zkoumání reakce na oheň je prováděno na základě normy ČSN EN 13501-1. Pórobeton se řadí do třídy A1, což znamená, že je nehořlavý a nepřispívá k vývinu požáru [35].

5. Teoretický návrh výrobku z pórobetonu s lepšími tepelně-izolačními vlastnostmi

Jedním ze současných trendů ve stavebnictví je použití nových výrobků s lepšími tepelně-izolačními vlastnostmi, což zapříčiní snížení tloušťky konstrukce, či zcela vyloučí nutnost dodatečné izolace. Typickým materiálem tohoto druhu je pórobeton (AAC). I přes současnou dostupnost mnoha vyspělých AAC výrobků na evropském trhu stále probíhá výzkum, zaměřený na zlepšení tepelně-vlhkostních a mechanických parametrů AAC. Inovace ve složení AAC jsou hledány například v použití hydrofobních činidel a přírodních zeolitů. Další možností je využití různých odpadních materiálů, jako je např. popel, křemičité úlety nebo i jílovité odpady.

Platná česká norma ČSN EN 73 0540-2 [8] vyžaduje pro svislé vnější stěny součinitel prostupu tepla (U -hodnota) 0,30 W/(m²·K), ale doporučuje 0,20 W/(m²·K) pro lehké konstrukce. Také specifikuje hodnoty pro pasivní domy, a to 0,18-0,12 W/(m²·K). Díky zděcím

prvkům z pórobetonu běžně vyráběných rozměrech, které jsou k dispozici na evropském trhu, splní konstrukce požadované a doporučené U -hodnoty. Tím pádem může být vyžděna jednovrstvá obvodová konstrukce bez tepelné izolace. Nicméně požadavky evropských norem pro tepelnou ochranu budov se v posledních letech neustále zvyšují a U -hodnoty pro pasivní domy jsou velmi nízké [21].

Zástupce zateplovacích systémů na bázi silikátového AAC je MULTIPOR od firmy Xella s.r.o. Jeho využití je v současné době především pro vnitřní zateplení (např. garáže), zateplení střech i vnější zateplení. Výroba MULTIPORU je velmi náročná a nákladná. Navíc tento materiál vykazuje nízké pevnosti v tlaku, a také je velmi měkký. Snahou je vyrobit materiál současnou dostupnou technologií s nízkými náklady na výrobu. Tento materiál by měl mít nízkou tepelnou vodivost, nízkou objemovou hmotnost, avšak dostatečnou pevnost. Další problematikou a předmětem zkoumání je vlhkostní chování AAC prvků, které výrazně ovlivňuje tepelně-izolační vlastnosti.

5.1 Výroba

Důležitý předpoklad pro výrobu lehkého autoklávovaného materiálu pro zateplení je jemnost částic jednotlivých složek. Se zvýšením celkového měrného povrchu záměsi v důsledku použití jemných práškových surovin dochází při použití stejného množství plynotvorného činidla ke zvýšení celkové porosity, tedy ke snížení výsledné objemové hmotnosti produktu v důsledku vyšší adsorpce plynu na částice a celkově nižší hmotností těchto částic, které tak mohou být snadněji v daném objemu transportovány.

Konečné mechanické vlastnosti jsou dány poměrem výchozích surovin, jejich charakterem a termodynamickými podmínkami při jejich mísení a následném autoklávování. Návrh receptury se zakládá na zvolení vhodné poměru výchozích surovin. Důležité je nastavení vhodného hmotnostního poměru aktivního CaO a SiO_2 ve směsi (C/S poměr) vhodného pro tvorbu tobermoritu. Nutné je též vhodné zvolení vodního součinitele, vztaženého na suché položky. Vyšší vodní součinitel, tedy řidší směs, je velmi důležitá při rovnoměrném kynutí hmoty a její lepší homogenizaci [24].

Pro dosažení žádaných vlastností je nutné nezapomenout na další vlivy, jako například teplota vody, přídavek příměsí atd.

Vlastní výrobní proces se neliší od klasické výroby běžného sortimentu. Rozdíl je v receptuře. Jako výrobní technologie byla použita CALSILOX.

6. Možnosti uplatnění lehkého autoklávovaného materiálu na silikátové bázi při zateplování budov

Vlastnosti lehkého autoklávovaného materiálu s objemovou hmotností do 200 kg/m^3 na silikátové bázi jej neumožňují použít jako konstrukční zdivo. Perspektivní možnost využití však poskytují například izolační předstěny. Nadále budou v této kapitole zmíněny i další varianty využití, jako jsou kompozitní panely nebo výplňové stěny.

6.1 Izolační předstěny

Upevnění kontaktních zateplovacích systémů (ETICS) v nichž tvoří tepelnou izolaci desky z pěnového polystyrenu EPS nebo z minerální vlny MW se navrhuje dle ČSN 73 39 02 - Vnější tepelně izolační kompozitní systémy (ETICS) - Návrh a použití mechanického upevnění pro spojení s podkladem. Norma ČSN 73 29 02 navazuje na ČSN 73 29 01 a podrobně specifikuje postup při návrhu mechanického upevnění ETICS hmoždinkami pro systémy s charakteristickou plošnou hmotností vnějšího souvrství nejvýše 20 kg/m².

Druh fasádní kotvy a délka trnu je závislá na druhu zdiva obvodové stěny, výšce stavby a také umístění stavby, nebo povahy povětrnostních podmínek. Dále je závislá na hmotnosti tepelné izolace, kdy se při použití desek anebo lamel z čedičové vlny doporučuje použití fasádní hmoždinky s ocelovým trnem. Ocel má vysokou tepelnou vodivost a v husté plošné síti těchto hmoždinek způsobují tepelné mosty, které snižují účinnost samotné izolace. Tyto faktory a další vlivy posuzuje statik. Podle toho určí jak druh hmoždinek, tak i délku trnu a druh trnu, způsob aplikace a ostatní postupy. Při osazování hmoždinek do minerální izolace je potřeba dbát na to, aby se povrch izolace nepoškodil [26].

Abychom vyloučili kotvení hmoždinkami, je tedy příhodné využít lehký pórobeton jako samonosnou izolační předstěnu. Vyzdívání předstěny by probíhalo na základ opatřený hydroizolací. Při zateplování stávajícího objektu by bylo nutné dodatečně základ vybetonovat. Samotné vyzdění však zcela neodstraní kotvení izolace. Stěna se musí mechanicky zajistit proti odklopení od nosné konstrukce. Vhodné je proto navrhnout například kotevní systém u horního okraje předstěny. Kotvicí prvek by mohl být tvořen profilovanou lištou, která by obepínala předstěnu v horní části a na druhé straně by byla pevně zakotvena v nosné konstrukci. Další možností je použít plastové kotvy pouze v nejvyšší části předstěny. Tyto konstrukční řešení jsou pouze teoretická a konkrétní návrh by musel posoudit statik.

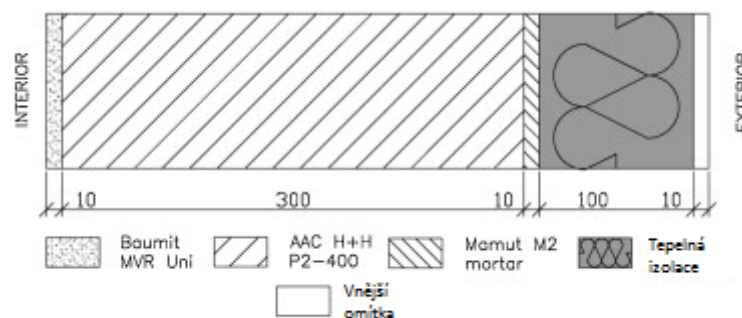
6.1.1 Samonosná vnější izolace

Jak bylo zmíněno výše, využitím samonosného izolačního zdiva odpadne kotvení, které zhoršuje tepelně-izolační vlastnosti izolace. Je nutno prověřit několik hledisek a konstrukčních řešení, aby celý systém fungoval a nevykazoval žádné negativní výsledky.

Jak je zřejmé z výsledků zaznamenaných ve studii (Maděra a kol.; 2010), životnost jednoduché AAC stěny bez povrchové úpravy je poměrně krátká, protože v prostředí s vysokým obsahem vlhkosti a cyklickému teplotnímu namáhání kondenzované vody dochází v podmínkách střední Evropy až 19 krát za referenční rok. První poruchy by se mohly projevit již po 2 letech. Potvrdilo se tak, že je nutné opatřit povrch pórobetonu vhodnou úpravou. První známka poškození se vyskytla před druhým rokem. Speciálně vyvinutá omítka od firmy Baunit pro AAC zdivo byla zcela dostatečná a nedošlo k žádným poruchám a vadám.

Obálka budovy se vždy chová jako systém. Proto vlastnosti jednotlivých částí systému, z konkrétních materiálů, musí být kompatibilní. K dosažení uspokojivých výsledků nestačí použití jednoho vynikajícího materiálu, ale je třeba vyvinout vícevrstvé systémy, které sestávají z různých materiálů. To je nejdůležitějším faktorem jakéhokoli počítačového návrhu obálky budovy z hlediska stavební fyziky. Cílem výzkumu (Maděra a kol.; 2010) bylo najít vhodný

materiál pro zateplení nosných stěn z pórobetonu. Pro konstrukci byly použity materiály, uvedeny v následujícím obrázku s tím, že tepelná izolace byla variabilní. Konstrukce byla orientována na jižní stranu [25].



Obrázek 4: Uspořádání vrstev zkoušeného systému [25]

V tomto výzkumu byly namodelovány okrajové podmínky, které se blíží reálným podmínkám v ČR.

Výsledky počítačové analýzy tepelně vlhkostního chování opláštění budov s vnější tepelně-izolačního systému je možno shrnout následujícím způsobem:

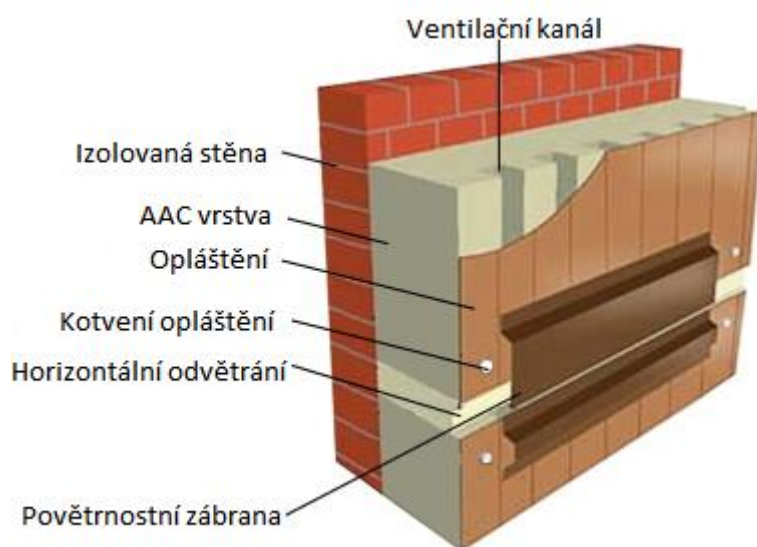
- Jak tepelně-izolační vrstva, tak i vnější omítka, by měla být paropropustná. To znamená, že hodnota faktoru difúzního odporu μ by měla být co nejnižší (pro zdivo $\mu < 5$, pro tepelnou izolaci $\mu < 10$). Nízká hodnota faktoru difúzního odporu vodní páry umožňuje velmi rychlý transport vodní páry skrz materiál, který stanovuje meze možného hromadění kondenzace.
- Rychlost transportu vlhkosti by měla co nejnižší a je vhodné použít hydrofobní činidlo. Omítka s nízkou kapilární absorpcí, absorbuje kapalnou vlhkost (pocházející například z dešťových srážek) velmi pomalu. Ta zůstává v blízkosti povrchu, kde se snadno odpařuje zpět do exteriéru a nemůže proniknout hlouběji.
- V rozporu s vnější omítkou musí být izolační materiál kapilárně aktivní. Díky této skutečnosti můžeme vyloučit použití nejběžnějších tepelně-izolačních materiálů, jako je polystyren nebo hydrofobní minerální vlna. Kapilární aktivitou tepelně-izolačního materiálu je dosaženo, že případná vlhkost je rychle přenesena přes izolační vrstvu k vnějšímu povrchu a odtud se pak postupně odpařuje.
- Maximální hygroskopický obsah vlhkosti vnější omítky by měl být okolo $0,005 \text{ m}^3/\text{m}^3$, pro tepelně-izolační vrstvy by měl být mezi $0,01$ a $0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$ [25].

6.1.2 Fasádní systém s ventilačními kanály

Odvětrávané fasádní systémy nacházejí v posledních letech stále větší uplatnění. Lze je využít v různých klimatických pásmech. Charakteristiky odvětrávané fasády jsou ovlivněny venkovními podmínkami (sluneční záření, směr a rychlost větru a teplota venkovního vzduchu). Další ovlivnění může být díky vnitřním podmínkám (teplota a vlhkost vnitřního vzduchu) a fasádním konstrukčním prvkům (konfigurace vzduchové mezivrstvy, složení použitých materiálů a jejich rozložení).

Problémem těchto systému je komplikované vytvoření simulovaného reálného prostředí, proto je mnoho studií zatím ve fázi vývoje. V nedávno publikovaných studiích byla zvláštní pozornost věnována několika konstrukčním prvkům odvětrávané fasády. Například bylo zjištěno, že i tvar a materiál finálního povrchu hraje významnou roli při vlivu na vnitřní mikroklima. V teplejších klimatických oblastech umožňují odvětrávané fasády snížit vliv vyhřátých vnějších ploch budovy stěn právě na vnitřní mikroklima. Tepelně-izolační materiály jsou do značné míry definovány vlhkostí materiálu. V oblasti s velmi nízkou teplotou a dlouhým chladným obdobím v zimních měsících je vlhkost jednou z hlavních funkcí odvětrávané fasády. Proto je velmi přínosná ventilace vzduchu, která udržuje materiál v suchém stavu.

Izolační vrstva v tomto systému může být tvořena z různých materiálů (např. minerální vlna), avšak při použití samonosné vrstvy z pórobetonu odpadá složité kotvení.

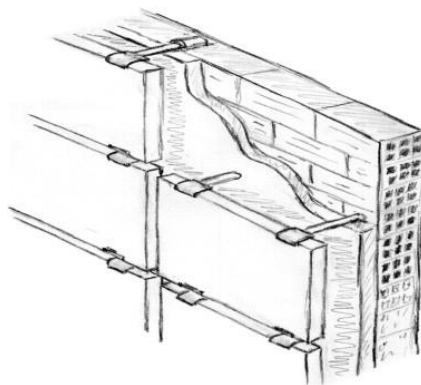


Obrázek 5: Příklad fasádního systému [27]

Různé studie a experimenty (např.: Nizovtsev, M.I.; 2014) prokázaly, že v systému s izolační vrstvou z minerální vlny během celého roku nedocházelo ke kondenzaci. Netvořily se plísňe a celková vlhkost jednotlivých materiálů dosahovala velmi nízkých hodnot. Jelikož má analyzovaný materiál z lehkého pórobetonu příznivé vlhkostní chování, dá se předpokládat, že i u této varianty nebude docházet k problémům vzniku plísni a kondenzace [27].

6.1.3 Odvětrávaný fasádní systém s otevřeným pláštěm

Otevřený plášť odvětrávaných fasád (dále jen OJVF) nahrazuje konvenční fasády u nových budov, ale i u renovací těch historických. Existuje několik důvodů, proč se tyto fasády staly tak populární mezi architekty. Jedním z hlavních důvodů je, že mohou tvořit téměř libovolnou kombinaci barvy a tvaru. Navíc montáž vnějšího pláště je jednoduchá a rychlá. Z technického hlediska mají tyto prvky dvě výhody. Za prvé, větrání snižuje problémy spojené s vlhkostí a za druhé, v letním období, kdy se teploty přes den pohybují vysoko a slunce přímo září na povrch fasády, zlepšuje (zejména OJVF) vnitřní klima budovy.



Obrázek 6: Skica odvětrávané fasády [28]

Desky vnějšího pláště se vlivem záření zahřívají, teplo přestupuje na vnitřní stranu a následně do vzduchové mezery. V této části proudící vzduch odebere část tepelné zátěže, čímž se snižuje přenos tepla do vnitřního prostředí. Tento jev se také vyskytuje v případě, že otvory jsou pouze v dolní a horní části fasády. Účinnost ale není tak vysoká v důsledku snížení průtoku a vyšších teplot dosažených v horní části vzduchové mezery. Výzkum (SANJUAN, C; 2011) prokázal, že tento systém je vhodný spíše na jižní stěny, které jsou více prosluněné. Je vhodný také do prostředí s mírnými a krátkými zimami a horkými léty. Avšak nelze komplexně prokázat, který systém je úspornější v celkovém hledisku. Je předmětem dalšího zkoumání, kdy by jako izolační vrstva byly použity bloky z lehkého pórobetonu [28].

6.2 Kompozitní UHPC-AAC fasádní prvky s modifikovanou vnitřní omítkou u novostaveb i rekonstrukcí

Povědomí o vlivu stavebnictví na životní prostředí se neustále zvyšuje. Železobeton je nejběžněji používaný stavební materiál, i když s jeho výrobou koresponduje velká spotřeba energie. Výhodné je proto zkoumat k železobetonu alternativy. V této souvislosti se jeví jako slibný ultravysokohodnotný beton (UHPC), který mají výhody, jako je například nižší provozní energie či nižší dopad na životní prostředí. Předpovědi naznačují, že UHPC kompozitní prvky pro opláštění budov by mohly mít další výhody. Mezi ně patří zvýšená životnost, optimalizované využití zástavby v důsledku menší tloušťky prvků a minimalizování požadavků na údržbu. Toho je docíleno díky absenci výztuže nebo použití nekorozivních výztužných materiálů, jako jsou uhlíková vlákna. V rámci projektu H-HOUSE financovaného Evropskou komisí, se již vyrábí tyto kompozitní prvky. Cílem je vytvořit fasádní panely kombinující izolační vrstvu s nosným rámem. Izolační vrstvu tvoří lehký pórobeton nebo lehký buněčný beton (CLC) a nosnou vrstvu představuje UHPC. Pro zvýšení komfortu obyvatel a jejich zdraví musí být hygroskopické materiály, které jsou schopny tlumit vnitřní vlhkost, aplikovány na vnitřní straně těchto prvků. Očekává se, že díky tomu bude vnitřní vlhkost více stabilní, což následně zlepší vnitřní klima a minimalizuje potenciální rozpad stavby [29].

Vlastnosti

Účelem adekvátního obvodového pláště budovy je ochrana proti vnikání vlhkosti, tepelným ztrátám v zimě, nadměrné zahřívání v létě. Měl by být schopen v interiéru zadržovat teplo a vytvářet příjemné vlhkostní klima. Také by měl eliminovat znečišťující látky a hluk. Obě

složky pláště musí být odolné, energeticky úsporné a cenově dostupné. V rámci tohoto výzkumu je prezentován vývoj prototypu fasádních prvků, zahrnující tepelně-vlhkostně upravené UHPC v kombinaci s AAC nebo CLC. Pro zlepšení kvality vnitřního prostředí s ohledem na vyváženou úroveň vnitřní vlhkosti vzduchu, je vhodné použít hliněnou omítku modifikovanou aerogelem. Tato kombinace zabraňuje zvyšování vlhkosti. UHPC vykazuje extrémní vysokou pevnost a vynikající chemickou odolnost. Výjimečných vlastností UHPC dosahuje díky optimalizované křivce zrnitosti a významné snížení vody v cementové pastě v porovnání s běžným betonem (Larrard & Sedran, 1994). Zpracovatelnost UHPC se upraví přidáním vysoce efektivních superplastifikátorů, které umožní ztekucení betonu nebo dosažení samozhutitelné vlastnosti. Velmi vysoká objemová hmotnost materiálu zajišťuje trvanlivost. Četné studie prokázaly, že vzhledem k omezené adsorpci vlhkosti a zanedbatelnému transportu vlhkosti, je UHPC odolnější proti jakémukoli zhoršení mechanických vlastností, než běžný hutný beton. V případě použití UHPC jako opláštění budov, je UHPC odolný proti zmrazování a rozmrazování a pronikání chloridových iontů v přímořském prostředí (Ahlborn et al., 2008; Thomas et al, 2012 ; Piérard et al, 2012.). UHPC již byl úspěšně aplikován na konstrukcích pozemních staveb, jako jsou lehké střešní konstrukce, fasádní prvky (Acker a Behloul 2004 ; Behloul & Batoz, 2008 ; Rebentrost & Wight, 2008a ; Szolyd, 2014) a ochranné panely (Rebentrost & Wight, 2008b). V této studii byl použit lehký AAC s objemovou hmotností v suchém stavu v rozmezí 100 až 115 kg/m³. Ke zlepšení mechanických vlastností stojí za uvážení použít i AAC s mírně vyšší objemovou hmotností (cca 170 kg/m³). Jeho tepelná vodivost bude i tak nízká a bude ověřena v praktické části [29].

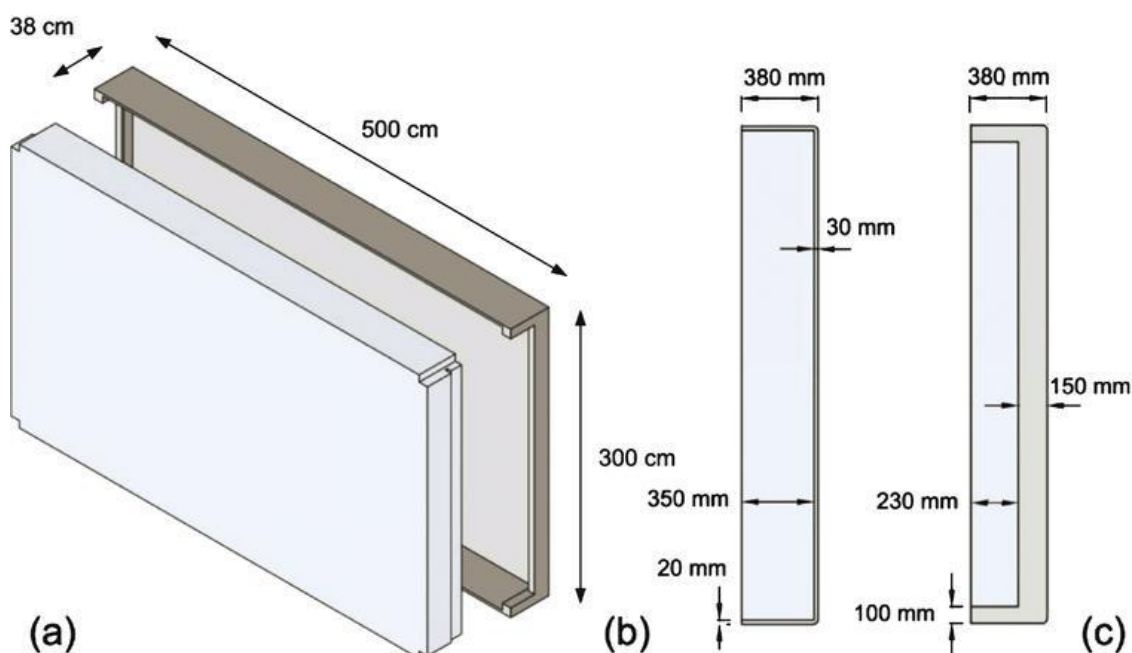
Fasádní prvek

Obecná myšlenka je, že vnější plášť z UHPC bude využíván jako skříňový prvek (Obr. 1). Pokud bude vazba mezi UHPC a AAC dostatečně vysoká, aby se zabránilo oddělení těchto vrstev při naklonění a následné přepravě celého panelu, nebude nutné instalovat další kotevní prvky. Kromě toho, hrany tvoří rám a zlepšují tuhost skříňového nosného prvku. Toto umožňuje snížení tloušťky vnější vrstvy UHPC. V rozích je průřez rámu rozšířen o kotevní sestavy pro přepravu a uložení. Obr. 2 poskytuje přehled geometrie panelů. Design byl založen na předpokladech, týkajících se zatížení požadovaných Eurokódem 2 (EN 1992-1-1, 2004). Byla uvažována zejména rychlost větru 44 m/s a odpovídajícího zatížení větrem 1,66 kN/m² [29].



Obrázek 7: Fasádní panely z UHPC/AAC kompozitu [29]

Na obrázku 8 je znázorněn panel ($5\text{ m} \times 3\text{ m}$) v axonometrickém pohledu (A), svislém řezu v polovině panelu (B) a v bočním pohledu (C).



Obrázek 8: Pohledy a řez UHPC/AAC panelu [29]

UHPC vrstva

Vzhledem k mimořádně vysoké pevnosti a vysoké objemové hmotnosti UHPC, je možné vyrobít velmi tenké a odolné fasádní prvky. Použití UHPC na výrobu lehkých prvků by snížilo dopad na životní prostředí ve vztahu k výrobě, dopravě a montážním procesům.

UHPC z této studie je založen na Dyckerhoff Nanodur® technologii. Nanodur sloučenina obsahuje ultrajemné komponenty s velikostí zrn menší než $250\text{ }\mu\text{m}$ (portlandský cement, vysokopecní struska, křemen, syntetický oxid křemičitý), které jsou za sucha aktivně smíšeny. Tímto způsobem je dosaženo dokonalé homogenity a mokrý proces míchání UHPC ve standardní míchačce se výrazně zjednoduší. Nanodur cement je CEM II-BS-52,5 R v souladu s normami (EN 197-1, 2011).

Dalšího snížení nepřímé energie na výrobu bylo dosaženo náhradou portlandského cementu různými typy energeticky méně náročných cementů nebo doplňkových cementových materiálů (SCM), pocházející také z průmyslových odpadů. Aby se zlepšily vlastnosti UHPC, tak se aplikuje hydrotermální vytvrzování pomocí autoklávování.

Požadavek na minimální pevnost v tlaku je 100 N/mm^2 a také se dbá na vysokou kvalitu vytvořeného UHPC povrchu [29].

AAC vrstva

Struktura materiálu AAC je charakterizována pevnou kostrou a aeračními póry, které jsou vytvořeny během expanze hliníku v kaši. Pevná kostra se skládá z hydrotermálních

syntetizovaných krystalických kalcium-silikátových-hydrátů (hlavně tobermoritu) a navíc z drobných částí nezreagovaného písku [29].

Jelikož AAC vrstva bude zasazena v nosném rámu z UHPC, nebudou na ni kladeny požadavky na pevnosti v tlaku a tahu. Bude sloužit pouze jako výplňová konstrukce s tepelně-izolačními požadavky. Ve studii (Miccoli, 2016) [29] se uvažuje použití prvku s objemovou hmotností do 115 kg/m^3 , což představuje v současném sortimentu AAC prvek od firmy Xella s.r.o. s názvem MULTIPOR. Avšak tento prvek má velmi malou mechanickou odolnost a lze jej snadno poškodit a je křehký. Proto je možno zasadit do kostry i výrobek, zkoumaný v této bakalářské práci, který má o něco vyšší objemovou hmotnost. V závislosti na vyšší objemové hmotnosti je prvek pevnější a jeho tepelně-izolační vlastnosti jsou velmi příznivé.

Technologie výroby

Smyslem této kapitoly je prezentovat technologii výroby, používané pro výrobu UHPC-AAC kompozitních prvků. V podstatě připadá v úvahu několik technologií výroby, které je nutno prozkoumat a zanalyzovat výsledky. Následně je nutné provést optimalizaci pro ideální postup výroby.

V první verzi by byla vytvořena kostra z UHPC betonu odlitím do připraveného bednění. Poté by byla kostra vytvrzena a následně by do ní byla vložena izolační vrstva z AAC. Ta by byla přilepena přípravkem na bázi minerálního lepidla s nízkým smrštěním. To by zajišťovalo vhodnou dilataci mezi dvěma materiály s jinou tepelnou roztažností, tak aby nedocházelo ke vzniku trhlin.

Další možností je využití izolační vrstvy z AAC jako vnitřní bednění. Izolační deska se umístí do vnějšího bednění tak, aby byla v horizontální pozici. Poté se otvorem v bednění vlije UHPC, který teče kolem desky z AAC. Zde se dostáváme k jednomu z důvodů použití zkoumaného materiálu namísto MULTIPORU. Vlévaný beton by tento měkký materiál mohl poškodit. Hrubá textura AAC umožní dokonalé spojení dvou vrstev. Opět se zde vyskytuje otázka, jaké bude vzájemné chování materiálu při objemových změnách. Samotný AAC vykazuje nízké hodnoty, avšak tlak UHPC by mohl způsobit vznik trhlin. Proto by bylo vhodné provést zkoušky a případně navrhnout řešení. První variantou by mohlo být vložení dilatační vrstvy z vhodného materiálu na AAC desku před vléváním UHPC do formy. Další variantou by mohlo být použití kompozitní UHPC vyztužený umělými vlákny z různých materiálů.

Třetí možností výroby panelu je vytvoření vnějšího bednění z UHPC. To zatuhne v běžném prostředí tak, aby následně posloužilo jako forma pro odlev AAC. To se poté nechá vyzrát a nakynout, provede se odřez přerostu a vše se umístí do autoklávu [29].

Abychom dosáhli ještě lepších tepelně-izolačních vlastností, je možné panel dodatečně zateplit menší vrstvou izolace. Tím by se utěsnily spáry mezi panely a ošetřily by se horší izolační vlastnosti UHPC.

Celá výroba je ve fázi vývoje a je nutno vyřešit všechny nedostatky. Dosud byly vyrobeny prototypy, ale stále je na čem pracovat, aby výroba byla efektivní, co nejlevnější a bez vad [29].

6.3 Výplňové zdivo skeletů

Nejrozšířenějším příkladem použití lehkého pórobetonu s objemovou hmotností nižší než 200 kg/m^3 jsou monolitické skeletové stavby. Kombinace nízké hmotnosti, jednoduché technologie zdění a velmi dobrých tepelně izolačních vlastností činí z tvárnic YTONG optimální materiál pro výplňové a obvodové zdivo těchto budov. Tento materiál má podobnou tepelnou akumulaci a akustické parametry jako tradiční zdící prvky, ale oproti nim násobně nižší hmotnost. Do skeletu tedy vnáší podstatně nižší zatížení. Ze statického hlediska je proto možné stěny a příčky navrhovat volněji v celé dispozici jednotlivých podlaží. Nosný systém může být dimenzován na menší namáhání. Výsledkem bývají často významné úspory železobetonu v nosném skeletu. Další výhodou je snadné lepení tvárnic na tenkovrstvou maltu a jednoduché řezání pórobetonu. To zaručuje přesné zdění bez zbytečných odpadů, bez tepelných mostů a bez objemných sil či míchaček. Spotřeba malty proti jinému zdivu je minimální, navíc se ze suché směsi YTONG připravuje přímo na místě zdění pomocí obyčejné vrtačky. Pro splnění požadavků normy na součinitel prostupu tepla bude tloušťka stěny závislá na součiniteli tepelné vodivosti, který bude měřen v praktické části. Z důvodu výskytu tepelných mostů v oblasti stropní konstrukce, je nutné provést ještě vnější zateplení těchto míst, nebo by bylo vhodné prozkoumat možnosti, jak tento problém odstranit.



Obrázek 9: Bytový dům v Uherském Hradišti

6.3.1 Zavěšený stěnový systém

Jednu z možností, jak vytvořit fasádu u skeletových konstrukcí, nám ukázal projekt Vienna Point v Brně. Základem jsou prefabrikované armované panely HEBEL a přesné zdící tvárnice YTONG od firmy Xella s.r.o. Na nosný systém v každém podlaží byl zavěšen panel Hebel tloušťky 200 mm délky 6 metrů. Řada horizontálních panelů výšky 600 mm v úrovni stropní konstrukce každého z pěti nadzemních podlaží nese zbytek fasády celého podlaží včetně nadezdívky a meziokenních pilířů ze systému tvárnic Ytong stejné tloušťky 200 mm, okenních výplní, dodatečné minerální izolace a finálního obkladu z leštěné žuly [30].



Obrázek 10: Zavěšený fasádní systém při stavbě Vienna Point [30]

Zde se naskytuje možnost využití tvárnic z pórobetonu, které mají velmi malou objemovou hmotnost, jsou samonosné a příliš by nezatěžovaly fasádní nosné panely. Jejich nízký součinitel tepelné vodivosti by zajišťoval malou tloušťku stěny, a tím by nezasahoval do dispozice. Výhodou je kompatibilita nosného a výplňového materiálu. Efektivním řešením je i využití např. slunolamů, které zaručí, aby se konstrukce zbytečně nepřehřívala.

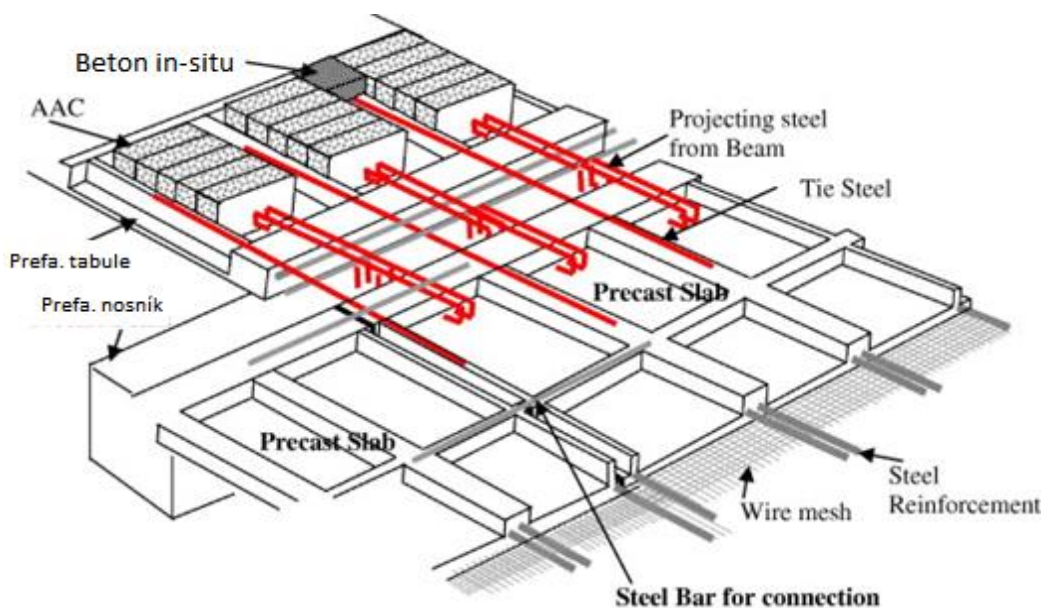
6.4 Jádrová výplň prefabrikovaných stropních dílců

Tato experimentální studie se zabývá použitím AAC, jako výplňový materiál pro poloprefabrikovaný panel. Zkoumá se konstrukční provedení a celkové snížení hmotnosti. Výhodou AAC desek je rozměrová variabilita. Výsledky testů ukázaly, že AAC kompozitní prefabrikovaný panel poskytuje přiměřenou redukci hmotnosti, aniž by byla snižována konstrukční kapacita.

Tyto kompozitní deskové systémy byly určeny jako vhodné pro stropní panely. Snížení hmotnosti je dosaženo nahrazením jádra panelu, bloky s nízkou objemovou hmotností. Spojení AAC bloků s hutným betonem se ukazuje jako velmi výhodné. Ve srovnání s jinými běžnými střešními systémy, AAC kompozitní panely snižují spotřebu energie v budovách svými izolačními vlastnostmi.

Výpočty ukazují, že přibližně 40-60 % z celkového zatížení zabírá vlastní tíha nosného prvku. Proto toto odlehčení může vést ke zmenšení průřezu a úspoře materiálu. Další výhodou těchto dílců je ta, že se sníží zátěž na vozidla, přepravující dílce z výroby na staveniště [31].

Následující schéma ukazuje, jak by taková spřažená konstrukce mohla vypadat.



Obrázek 11: Příklad spřaženého kompozitního systému [31]

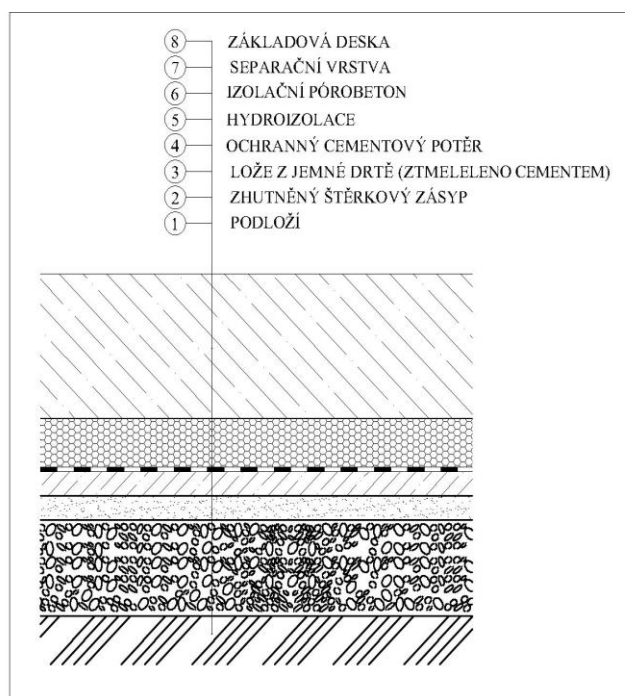
6.5 Součást konstrukce podlah

Tvárnice z lehkého pórobetonu by mohly být využity jako izolační a zároveň jako částečná roznášecí vrstva. Výhodou tohoto řešení je nízké zatížení vlastní tíhou ($1,7\text{--}2,0 \text{ kN/m}^3$) na stropní konstrukci. Je nutno zjistit mechanické vlastnosti tohoto materiálu, aby byl splněn požadavek na mechanickou odolnost. Pro splnění požadavků na vzduchovou neprůzvučnost lze tuto variantu použít pouze na těžkou stropní konstrukci (nad 350 kg/m^2) nebo na stropní konstrukci, kde akustickou funkci plní podhled. Na horní povrch tvárnic by pak navazovala velmi tenká vyrovnávací vrstva, na kterou by byla kladena nášlapná vrstva podlahy. Výška tvárnic se musí zvolit s ohledem na tepelně-izolační požadavky. Spadá do kategorie A1 reakce na oheň. Tudíž je lze použít tam, kde se jiné izolační materiály použít nesmí.

6.6 Zateplení základové desky či vnější zateplení suterénu

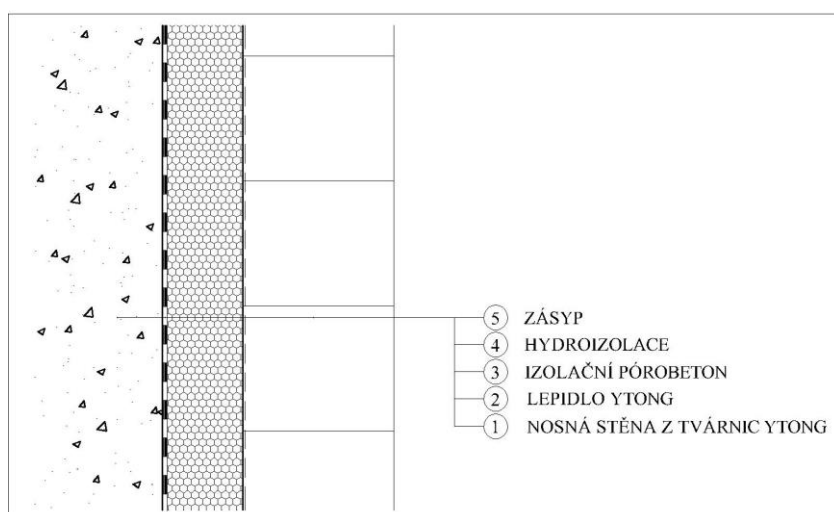
Zajímavým uplatněním lehkého pórobetonu může být zateplení konstrukcí, uložených v kontaktu se zemí. Tyto místa jsou kritická z hlediska tepelných mostů. Navíc je v současnosti z ekonomického důvodu snaha využít suterénní místnosti k rezidenčním nebo administrativním účelům. Izolace musí mít po zabudování v základové konstrukci trvalé vlastnosti, protože je poté nepřístupná. Materiál pro tyto izolace musí vykazovat vyšší pevnosti v tlaku, dlouhou trvanlivost a musí být dobře izolována proti vlhkosti.

Abychom zabránili navlhnutí materiálu, musí být izolace z pórobetonu kladena na podkladní vrstvu, která bude opatřena hydroizolací. Podlaha by měla být středně těžká, na které nebude působit zvýšené zatížení (např. těžké výrobní stroje, pojezd těžkých vozidel, atd.). Pokud bude výrobek z pórobetonu dosahovat pevnosti v tlaku alespoň $0,6 \text{ MPa}$, může být do konstrukce použit. Zatížení působící na izolaci musí být posouzeno statikem. Na obrázku 12 je uveden příklad skladby zaizolované základové desky.



Obrázek 12: Příklad zateplení základové desky

Při zateplení svislé nosné stěny (obr. 13) odolává izolační materiál tlaku zeminy a případně tlaku podzemní vody. Opět zde platí podobné podmínky, aby bylo možné takovou konstrukci postavit. Výrobek nesmí být vlhký (max. provozní vlhkost), protože by neměla vlhkost kam unikat. Z vnějšího líce je umístěna hydroizolace, která musí být dokonale provedena. Tepelná izolace je pak spojena se svislou nosnou konstrukcí pomocí lepidla na pórobeton.



Obrázek 13: Příklad zateplení suterénní zdi

V neposlední řadě je nutné vyřešit detaily v oblasti styku svislé izolační vrstvy s vodorovnou, a také v úrovni terénu.

C. PRAKTICKÁ ČÁST

Na základě rešerší odborných publikací bylo zjištěno, že je nejvíce perspektivní uplatnění lehkého autoklávovaného pórobetonu (obj. hmotnost do 200 kg/m^3) v izolačních předstěnách. Tyto předstěny mají výhodu v absenci kotvení do nosné konstrukce, čímž se zamezí nechtěnému úniku tepla přes tyto kotvy. Předstěny jsou založeny jako klasické zdivo s tím rozdílem, že neponesou žádnou jinou konstrukci, ale pouze vlastní tíhu a vnější povrchovou úpravu. Z tohoto faktu vyplývá, že první požadavek bude na nízkou objemovou hmotnost, která sníží vlastní hmotnost konstrukce, a tudíž by výsledná pevnost v tlaku nemusela být vysoká. S nízkou objemovou hmotností souvisí součinitel tepelné vodivosti, který bude díky charakteru materiálu nízký. Tento fakt umožní použít výrobek jako tepelnou izolaci. Další požadavek se týká dostatečné mechanické odolnosti, aby se výrobek při přepravě nepoškodil. Dále bylo nutno ověřit chování materiálu při styku s vodou, která negativně ovlivňuje ostatní vlastnosti materiálu. Pokud odpadne kotvení výrobku, musí vykazovat materiál i dostatečné tahové pevnosti. Stejně požadavky budou platit i pro aplikaci výrobku jako tepelné izolace základové desky a vnějšího zateplení suterénu. Zde je kladen největší důraz na dostatečnou pevnost v tlaku.

7. METODIKA PRAKTICKÉ ČÁSTI

V praktické části byl nejprve proveden průzkum trhu, který popisuje vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti izolačních materiálů, používaných pro kontaktní zateplovací systémy. Poté jsou popsány zkušební vzorky a jejich příprava před samotnými zkouškami, jejichž postupy jsou následně popsány. Výsledky zkoušek jsou uvedeny ve formě tabulek či grafů a jsou diskutovány. Souhrnně je vyhodnocení celé praktické části popsáno v závěru.

Na zkušebních vzorcích byly provedeny následující zkoušky:

- Stanovení objemové hmotnosti (ČSN EN 678)
- Stanovení pevnosti v tlaku (ČSN EN 679)
- Stanovení součinitele tepelné vodivosti (ČSN EN 12 667)
- Stanovení krátkodobé nasákavosti při úplném ponoření (ČSN EN 772-11)
- Stanovení koeficientu kapilární absorpce (ČSN EN 1015-18)
- Stanovení sorpční vlhkosti
- Zkouška tahové pevnosti podkladové vrstvy (ČSN 73 2577)

Nejprve byly z pórobetonového bloku připraveny zkušební vzorky daných rozměrů. Řezání probíhalo na kotoučové pile za mokra. Vzorky byly před samotným měřením vysušeny. Měření probíhalo v laboratořích fakulty stavební.

8. PRŮZKUM TRHU

Současný trh s tepelně-izolačními materiály v České republice nabízí širokou škálu výrobků s velkým rozptylem vlastností a možností uplatnění. Na základě dostupných informací jsou uvedeny základní fyzikálně-mechanické vlastnosti v tabulce č. 1. Jsou zde zastoupeny výrobky z různých materiálů. Jako srovnávací ukazatel je uvedena potřebná tloušťka konstrukce pro dosažení tepelného odporu $R=5 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$.

Tabulka 1: Přehled izolačních materiálů používaných pro kontaktní zateplovací systémy

č.	Výrobce + produkt	Objemová hmotnost $[\text{kg/m}^3]$	Souč. tepelné vodivosti λ_D $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	Tloušťka izolace pro $R=5 \text{ [m]}$	Cena za m^2 pro dosažení $R=5$ $[\text{Kč}]$	Faktor difuz. Odporu $[-]$	Třída reakce na oheň
1	ISOVER Synthos XPS Prime 30 L	33	0,035	0,18	900,-	>100	E
2	ISOVER EPS 100F	20	0,039	0,20	490,-	50	E
3	ISOVER NF 333 (čedič. vlna)	88	0,041	0,21	460,-	1	A1
4	BAUMIT Austrotherm XPS TOP P GK	>30	0,038	0,20	620,-	>100	E
5	BAUMIT openTHERM EPS	20	0,039	0,20	460,-	< 10	E
6	KINGSPAN KOOLTHERM K5	35	0,020	0,10	1 035,-	35	C
7	REFAGLASS (desky z pěnového skla)	140	0,060	0,30	3 000,-	∞	A1
8	KNAUF HERAKLITH C	113	0,070	0,35	349,-	5	B
9	CANABEST PANEL	100	0,042	0,21	1200,-	2	E
10	ROCKWOOL FASROCK LL	77	0,041	0,21	500,-	1	A1

Výrobci v některých případech uvádějí rozptyl hodnot, nebo zařazení do kategorií, proto byly vybrány průměrné hodnoty. Hodnoty součinitele tepelné vodivosti se pohybují od 0,020 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ u desky KOOLTHERM K5 z fenolické pěny až po 0,070 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ u desky HERAKLITH C z dřevité vlny. Rozdíly jsou patrné i u hodnot objemových hmotností. Nejlehčí materiál ISOVER EPS 100F z expandovaného polystyrenu má objemovou hmotnost 20 kg/m^3 a zastává funkci tepelné izolace. Srovnáno bylo také cenové hledisko. Cena je uvedena za m^2 plochy při takové tloušťce materiálu, aby byl tepelný odpor $R=5 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$. Nejlevnější výrobek KNAUF HERAKLITH C stojí 349 Kč, naproti tomu deska z pěnového skla od firmy REFAGLASS stojí 3 000 Kč.

9. PŘÍPRAVA A OZNAČENÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Příprava zkušebních vzorků

Jednotlivé vzorky byly nejprve nařezány na kotoučové pile na požadované rozměry:

- Krychle (100x100x100 mm) = stanovení objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku, celková nasákavost
- Desky (200x200x33 mm) = stanovení součinitele tepelné vodivosti
- Trámečky (40x40x160 mm) = sorpční vlastnosti, kapilární absorpce
- Na zkoušku tahové pevnosti podkladové vrstvy byly použity nenařezané pórobetonové bloky, či dostatečně silné odřezky.

Po nařezání se nechaly vzorky vysušit v sušárně. Také bylo potřeba vzorky upravit pomocí smirkového papíru, čímž se odstranily drobné nerovnosti na povrchu.

Označení zkušebních vzorků

Vzorky byly zařazeny do základních dvou kategorií. Na prvních dvou vzorcích jsou jejich vlastnosti odhadované a jejich předpoklad bude v praktické části ověřen. Pro srovnání pak slouží třetí vzorek (P2-350) se známými vlastnostmi.

VZOREK A = předpokládaná objemová hmotnost cca 160 kg/m³ a pevnost cca 0,8 MPa

VZOREK B = předpokládaná objemová hmotnost cca 180 kg/m³ a pevnost cca 0,8 MPa

REFERENČNÍ VZOREK = objemová hmotnost do 350 kg/m³ a pevnost nad 2 MPa

Pozn.: Objemová hmotnost se uvažuje ve vysušeném stavu a pevnost v tlaku s obsahem vlhkosti cca 6 %.

VZOREK A a VZOREK B pocházejí z různých odlevů a tudíž se jejich vlastnosti mohou lišit.

10. POPIS PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK

10.1 Stanovení objemové hmotnosti (ČSN EN 678)

Podstata zkoušky

Zkušební tělesa se odeberou z prefabrikovaného dílce z pórobetonu. Objemová hmotnost v suchém stavu se stanoví jako poměr mezi hmotnostmi zkušebního tělesa po vysušení do konstantní hmotnosti při (105±5) °C a jejich objemem.

Zkušební zařízení a pomůcky

- a) pila na vyřezávání zkušebních těles;
- b) posuvné měřidlo, s nímž je možno odečítat rozměry zkušebního tělesa s přesností 0,1 mm;
- c) sušárna s ventilací umožňující udržovat teplotu na (105±5) °C;
- d) váha, umožňující stanovení hmotnosti zkušebního tělesa s přesností na 0,1 %.

Zkušební tělesa

Zkušební tělesa se odebrala vyřezáním na pile z nepoškozeného dílce tak, aby zkoušený výrobek reprezentovala. Tvar zkušebních těles byly krychle o hraně 100 mm. Zkušební sada se skládá ze tří těles, které se vysuší.

Zkušební postup

Vysušené vzorky zvážíme na váze a změříme posuvným měřidlem jejich rozměry na různých místech.

Vyhodnocení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost se vypočte z následujícího vztahu:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Kde:

ρ je objemová hmotnost [kg/m³]

m je hmotnost [kg]

V je objem [m³]

Výsledek se uvádí jako průměrná hodnota tří vzorků, zaokrouhlená na 1 kg/m³ [32].

10.2 Stanovení pevnosti v tlaku (ČSN EN 679)

Podstata zkoušky

Pevnost v tlaku se určuje na zkušebních tělesech jako poměr mezi zatížením při porušení tělesa při centrálním tlakovém namáhání a průřezovou plochou, ležící kolmo ke směru zatížení zkušebního tělesa.

Zkušební zařízení a pomůcky

- a) pila k vyříznutí zkušebního tělesa;
- b) zkušební stroj poháněný většinou zejména hydraulicky, který odpovídá požadavkům podle ISO 4012:1978, kapitoly 5;
- c) posuvné měřidlo s přesností 0,1 mm;
- d) sušárna s ventilací umožňující udržovat teplotu na (105±5) °C;
- e) váha, umožňující stanovení hmotnosti zkušebního tělesa s přesností na 0,1 %.

Zkušební tělesa

Zkušební tělesa jsou totožná jako ve zkoušce „Stanovení objemové hmotnosti“ v kapitole 8.1.3, tedy krychle o hraně 100 mm. Případné nerovnosti jsou zabroušeny.

Tělesa se kondicionují při teplotě nejvýše 60 °C, až jejich předpokládaný obsah vlhkosti činí (6±2) % hmotnosti. Po dosažení předpokládané vlhkosti musí být zkušební tělesa před zkouškou v tlaku uložena a chráněna před změnami vlhkosti. Před zkouškou pevnosti v tlaku se musí stanovit objemová hmotnost ve vlhkém stavu.

Zkušební postup

Tlačné desky zkušebního stroje se očistí a kondicionované zkušební těleso se vloží do zkušebního stroje a vycentruje se. Zatížení musí působit centricky a kolmo ke směru nárůstu hmoty. Zkušební těleso se musí zatěžovat rovnoměrně s konstantní rychlostí zatěžování až do porušení. Zaznamená se nejvyšší dosažené zatížení při porušení tělesa.

Vyhodnocení zkoušky

Pevnost v tlaku $f_{c,i}$ v N/mm² se vypočte z následujícího vztahu:

$$f_{c,i} = \frac{F_i}{A_{ci}}$$

Kde:

F_i je nejvyšší zatížení při porušení [N]

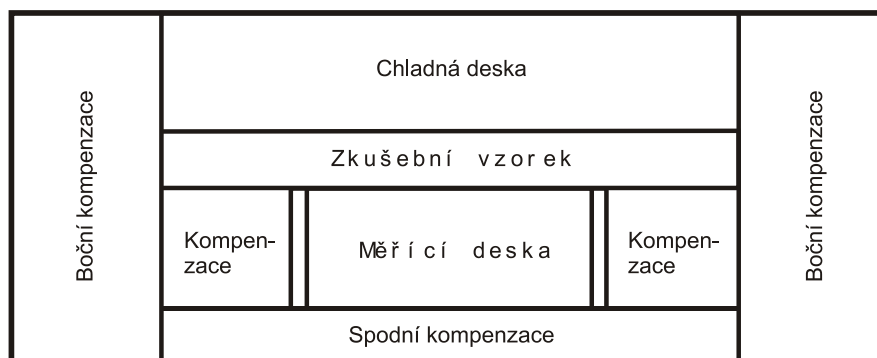
A_{ci} je průřezová plocha [mm²]

Výsledná pevnost v tlaku se udává s přesností 0,1 N/mm² a bude uvedena průměrná hodnota tří vzorků [33].

10.3 Stanovení součinitele tepelné vodivosti (ČSN EN 12 667)

Stanovení součinitele tepelné vodivosti bylo provedeno na deskových vzorcích o rozměrech 200x200 mm provedeno v souladu s ČSN EN 12667 Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku, přičemž pro stanovení hodnoty součinitele tepelné vodivosti byla zvolena metoda měřidla tepelného toku dle ČSN 72 7012-3 a ISO 8301. Princip stanovení součinitele tepelné vodivosti materiálů v ustáleném tepelném stavu je založen na stacionární metodě teplé desky. Měření bylo provedeno pomocí přístroje FOX 200 od firmy TA Instruments, kde byl zkušební vzorek umístěn mezi dvě desky vytápěné na rozdílnou teplotu, přičemž byla sledována hustota tepelného toku na definované ploše, teplotní spád mezi deskami a tloušťka zkušební vzorku. Přístroj umožňuje měřit součinitel tepelné vodivosti při různých teplotách, proto budou hodnoty uvedené pro každou teplotou [34].

Chráněná teplá deska



Obrázek 14: Chráněná teplá deska [35]

Výpočet součinitele tepelné vodivosti:

$$\lambda_{sam} = \frac{Q_d \cdot d_m}{A_d \cdot (\theta_{hd} - \theta_{cd})}$$

kde:

Q_d výpočtová hodnota tepla dodaného měřicí desce [J],

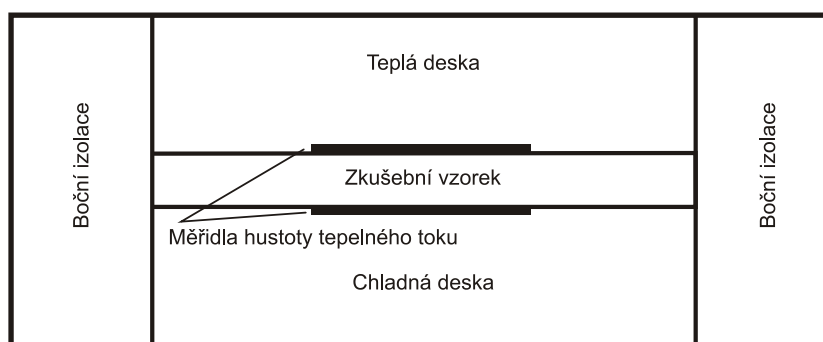
d_m průměrná hodnota tloušťky zkušební vzorku [m],

A_d účinná plocha [m²],

θ_{hd} výpočtová hodnota povrchové teploty teplé strany zkušební vzorku [°C],

θ_{cd} výpočtová hodnota povrchové teploty chladné strany zkušební vzorku [°C].

Měřidlo tepelného toku



Obrázek 15: Měřidlo tepelného toku [35]

Výpočet součinitele tepelné vodivosti:

$$\lambda_{sam} = \frac{U \cdot k_m \cdot d_m}{\theta_{hd} - \theta_{cd}}$$

kde:

d_m průměrná hodnota tloušťky zkušební vzorku [m],

θ_{hd} výpočtová hodnota povrchové teploty teplé strany zkušební vzorku [°C],

θ_{cd} výpočtová hodnota povrchové teploty chladné strany zkušební vzorku [°C],

k_m kalibrační konstanta [W·m⁻²·V⁻¹],

U napětí měřiče hustoty tepelného toku [V]



Obrázek 16: Přístroj FOX 200 [36]

10.4 Stanovení krátkodobé nasákavosti při úplném ponoření (ČSN EN 772-11)

Pro stanovení krátkodobé nasákavosti při úplném ponoření byla použita sada tří krychlí o hraně 100 mm od každého zkoušeného vzorku. Nejprve se zváží hmotnost suchých vzorků, které se následně umístí do nádoby s vodou tak, aby byly celé ponořené. Kvůli nízké objemové hmotnosti a struktuře vzorku musí být krychle zatíženy břemenem, aby neplavaly na hladině. Po uplynutí 24/48 hodin se vzorky povrchově osuší a zváží. Vypočte se krátkodobá nasákavost $w_{l24/48}$ v % podle následujícího vztahu [35]:

$$w_{l24/48} = \frac{m_{24/48} - m_s}{m_s}$$

Kde:

$m_{24/48}$ je hmotnost po 24/48 hodinách
 m_s je hmotnost vysušeného vzorku

10.5 Stanovení koeficientu kapilární absorpce (ČSN EN 1015-18)

Stanovení koeficientu kapilární absorpce se provádí v souladu s ČSN EN 1015-18: Stanovení koeficientu kapilární absorpce vody v zatvrdlé maltě. V našem případě se nejedná o zatvrdlou maltu, nýbrž o pórobeton, avšak postup a vyhodnocení byly totožné. Koeficient kapilární absorpce popisuje schopnost stavebního materiálu absorbovat kapalnou vlhkost v závislosti na čase. Jeho hlavní význam je především u hodnocení vnějších povrchových úprav a povrchů obecně, kdy hodnota součinitele kapilární absorpce představuje konstantu úměrnosti nasákavosti povrchu srážkovou vlhkostí. Koeficient kapilární absorpce vody C [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-0.5}$] popisuje na plochu vztaženou nasákavost způsobenou kapilárními nebo absorpčními silami materiálů při povrchovém smáčení bez přetlaku. Při stanovení součinitele kapilární absorpce je nutné zjistit časovou závislost kapilárního nasákání zkušební vzorku při kontaktu s kapalinou. Měření se provádí od vysušeného stavu zkušební vzorku do jeho nasáknutí. Zkouška se provádí na zkušebních vzorcích o rozměrech 40x40x160 mm. Zkouší se při teplotě $23 \pm 5^\circ\text{C}$, při relativní vlhkosti vzduchu 50 ± 5 %. Po vysušení do ustálené hmotnosti se jedna plocha zkušební tělesa ponoří do vody do hloubky 5 až 10 mm.

Potřebné zařízení:

Miska s hloubkou nejméně 20 mm s potřebnou plochou pro ponoření všech zkušebních těles, podnožky nebo rošt pod zkušební tělesa, stopky s možností odečtu v sekundách, laboratorní váhy s přesností 0,1 % celkové hmotnosti suchého zkušebního tělesa, sušárna, tkanina, mikrometrické posuvné měřidlo.

Postup zkoušky:

Připravená zkušební tělesa se zváží a následně se umístí do misky do vody s výškou hladiny 5 až 10 mm, aktivní zkušební plochou dolů (zkušební tělesa se staví na čelní plochu 40x40 mm). Mezi dno a zkušební těleso se umístí distanční podložky nebo rohož. Výška hladiny se po celou dobu udržuje v předepsané výši tak, aby bylo dosažené výše uvedeného ponoření zkušebních vzorků. Pro zajištění dokonalého styku zkušebního vzorku s vodou je nutné odstranit vzduchové bublinky tak, že se zkušební tělesa vkládají do vody v šikmé poloze. Po ponoření těles do vody se spustí stopky a provede se kontrola hladiny, resp. ponoření vzorků. Zkušební tělesa se vyjmou každých 10 minut, na povrchu se rychle otřou vlhkou tkaninou, zváží se a znovu se umístí do misky s vodou. Zkouška se ukončí v 90-ti minutách, kdy se tělesa naposledy zváží.

Vyhodnocení zkoušky:

Vyhodnocení zkoušky se provede graficky. Do grafu se vynese procentuální obsah vlhkosti zkušebních vzorků v závislosti na čase a dále se provede výpočet koeficientu kapilární absorpce dle následujícího vztahu [35]:

$$C = 0,1 \cdot (m_{90} - m_{10}) [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-0,5}]$$

kde:

m_{10} – hmotnost zkušebního vzorku v čase 10 min [g],

m_{90} – hmotnost zkušebního vzorku v čase 90 min [g].

10.6 Stanovení sorpční vlhkosti

Hmotnostní rovnovážná sorpční vlhkost ve stavebním nebo tepelně izolačním materiálu u_{ms} (%) je vlhkost, která se do něj dostane z okolního vzduchu pohlcováním vodní páry při jeho určité teplotě t , relativní vlhkosti RH a barometrickém tlaku p_b (barometrický tlak vzduchu se považuje zpravidla za konstantu) a stanoví se jako podíl hmotnosti rovnovážné sorpční vlhkosti m_{us} (kg) a hmotnosti suchého materiálu m_s (kg) vynásobený 100:

$$u_{ms} = \frac{m_{us}}{m_s} 100 = \frac{m_v - m_s}{m_s} 100$$

Kde:

hmotnost rovnovážné sorpční vlhkosti se stanovuje jako rozdíl hmotnosti vlhkého materiálu m_v (kg) a hmotnosti suchého materiálu m_s (kg):

$$m_{us} = m_v - m_s$$

Hmotnost suchého materiálu m_s je hmotnost, kterou má materiál po vysušení při 105-110 °C. Vysušování musí probíhat tak dlouho, až je dosaženo ustálené hmotnosti; za ustálenou se považuje hmotnost, jejíž úbytek při dvou po sobě jdoucích váženích v době sušení nepřesahuje 0,1 %, pokud příslušné normy nestanoví jinak, přičemž délka intervalu mezi dvěma po sobě jdoucími váženími je zpravidla 1 až 7 dnů.

Ke stanovení sorpční vlhkosti byly použity hranoly o rozměrech 40x40x160 mm, uložené v exsikátorech s prostředím o různých relativních vlhkostech.

Relativní prostředí bylo vytvořeno pomocí nasycených roztoků solí a kyselin, jak je uvedeno v tabulce č. 2:

Tabulka 2: Tabulka relativních vlhkostí vzduchu

Prostředí	12 %	33 %	55 %	75 %	88 %	97 %
Roztok	LiCl	MgCl ₂	Na ₂ Cr ₂ O ₇	NaCl	KCl	K ₂ SO ₄

Navíc byly použity hodnoty z klimakomor s relativním prostředím 50 % a 80 %.

10.7 Zkouška tahové pevnosti podkladové vrstvy (ČSN 73 2577)

Touto zkouškou stanovujeme (vyhodnocujeme) soudržnost jednotlivých vrstev, popř. soudržnosti finálních vrstev s jejím podkladem. Vzhledem k mechanickým vlastnostem zkoušeného výrobku předpokládáme, že místo porušení bude v podkladové vrstvě.

Příprava zkoušky

Nejprve bylo připraveno dvousložkové lepidlo z epoxidové pryskyřice SIKADUR® – 31 CF RAPID, aby poměr složek A:B byl 2:1. To bylo nanášeno ve vhodném množství na zkoušený vzorek. Vzdálenost těchto míst musí být od sebe vzdálen cca 10 cm. Na „bochánek“ byl následně přitlačen kovový terč se závitem. Lepidlo bylo ponecháno minimálně 24 hodin tvrdnout.



Obrázek 17: Dvousložkové lepidlo SIKADUR® (vlevo) a příprava zkušebních vzorků (vpravo)

V dalším kroku se pomocí úhlové brusky vytvořily kolem terče dva čtvercové zářezy asi 2-3 cm hluboké tak, aby druhý čtverec byl pootočený o 45° oproti prvnímu.

Zkoušení

Do závitů se zašroubuje kloubový prvek, na který se uchytí kotvící část odtrhového přístroje. Retenčním šroubem přitáhneme přístroj k podložce a nastavíme odečítání hodnoty od nulové hodnoty. Následně se točí klikou konstantní rychlostí až do porušení. Zaznamená se nejvyšší dosažená hodnota tahové pevnosti při porušení a místo porušení.

11. VÝSLEDKY ZKOUŠEK A DISKUZE

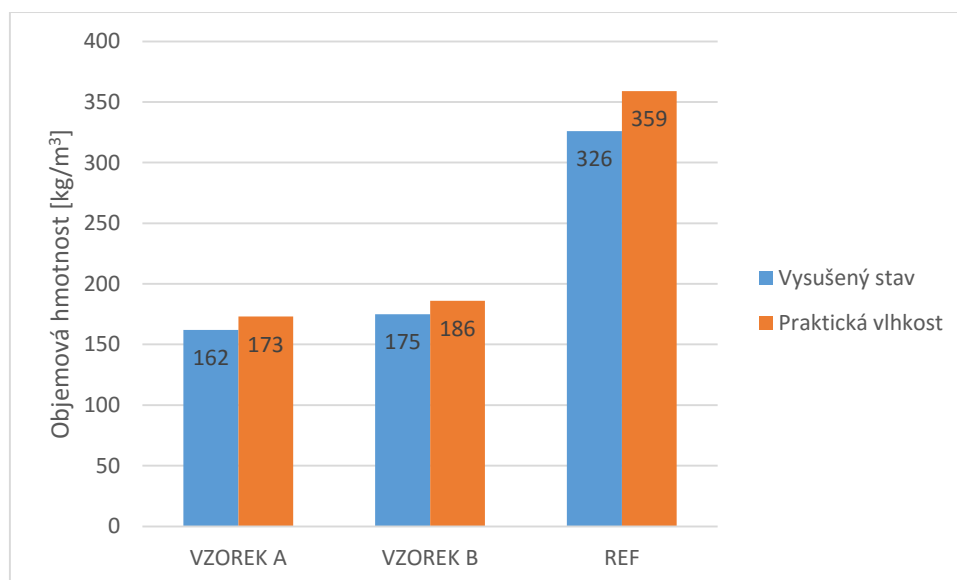
Na zkušebních vzorcích byly provedeny zkoušky dle postupů, které byly uvedeny v kapitole 8 „Popis prováděných zkoušek“.

11.1 Vyhodnocení základních charakteristik

Abychom mohli výrobek zařadit do třídy a zjistit jeho základní vlastnosti, bylo nejprve zjistit objemovou hmotnost a pevnost v tlaku. Tyto dvě charakteristiky spolu souvisí a udávají mj. jakost pórobetonu.

Objemová hmotnost

Tato zkouška byla provedena jako první, abychom získali přehled o materiálu a mohli ho následně charakterizovat. Objemová hmotnost byla stanovena ve vysušeném stavu. Pro porovnání je uvedena hodnota objemové hmotnosti ve stavu s provozní vlhkostí (viz. graf č.1).



Graf 1: Objemové hmotnosti materiálů

Naměřená objemová hmotnost v obou vlhkostních stavech splňuje požadavek lehkého autoklávovaného materiálu do 200 kg/m³. VZOREK A vykazuje nejnižší průměrnou

objemovou hmotnost. Nicméně rozdíl oproti VZORKU B není velký. Objemová hmotnost, změřená na referenčním vzorku, odpovídá jeho standardním hodnotám, uváděných výrobcem.

Pro bližší specifikaci budou v následujících kapitolách uvedeny grafy závislostí různých vlastností. S nízkou objemovou hmotností souvisí vysoká pórovitost materiálu, kdy jeho makropóry vylehčují celý výrobek.



Obrázek 18: Pórovitá struktura VZORKU A

Pevnost v tlaku

Již z důvodu nízké objemové hmotnosti lze uvažovat, že materiál nebude mít nosné uplatnění. Jeho struktura udává tepelně-izolační charakter. Tato zkouška ověřuje použití materiálu jako samonosného prvku. Před samotnou zkouškou byla stanovena vlhkost vzorků. VZOREK A i VZOREK B obsahovaly průměrně 4 % vlhkosti a REFERENČNÍ VZ. pak 8 %. Hodnoty jsou v toleranci, tudíž nezkreslují výsledné pevnosti.

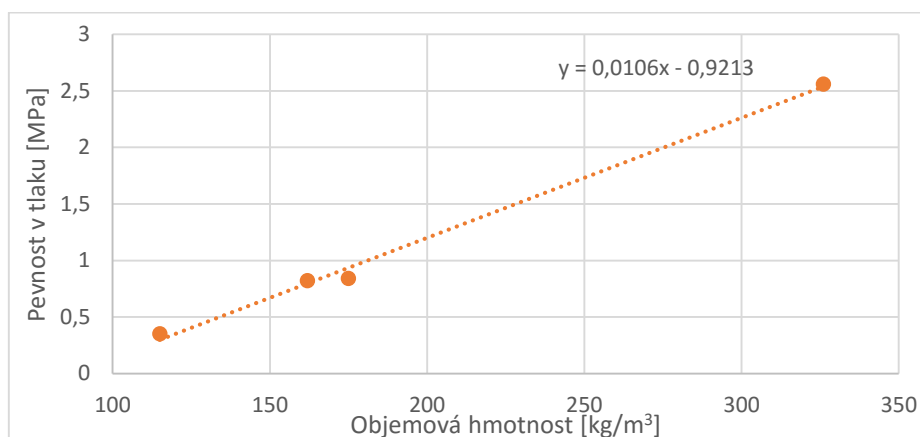
Zkušební krychle byly zatěžovány (v souladu s ČSN EN 679) centrickou silou, kolmo na směr nakypřování. Rychlost zatěžování byla zvolena s ohledem na charakter vzorku tak, aby porušení došlo během 30-60 s. a zatížení nebylo příliš nárazové.

Tabulka 3: Naměřené hodnoty pevností v tlaku

OZNAČENÍ VZORKU	PEVNOST [MPa]	SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	ϕ PEVNOST [MPa]
A-1	0,79	0,03	0,82
A-2	0,84		
A-3	0,84		
B-1	0,80	0,03	0,84
B-2	0,86		
B-3	0,85		
REF-1	2,49	0,07	2,56
REF-2	2,58		
REF-3	2,62		

Jak lze vyčíst z tabulky č. 3, hodnoty pevností nekolísají a nevykazují výrazné odchylky od průměrné pevnosti. Dosažené průměrné pevnosti odpovídají struktuře a objemové hmotnosti vzorků.

Měření základních charakteristik ověřilo předpoklady, stanovené před měřením. Obecně lze výrobek teoreticky zařadit do kategorie P0,7-200. Pro upřesnění výsledného grafu č. 2 byly použity hodnoty tepelně-izolačního materiálu MULTIPOR deklarované výrobcem.



Graf 2: Závislost pevnosti v tlaku na objemové hmotnosti

11.2 Součinitel tepelné vodivosti

Měření součinitele tepelné vodivosti při různých teplotách je důležité pro zohlednění vlivů venkovního prostředí na materiál. Pro vyhodnocení byly použity vysušené vzorky, které byly měřeny při středních teplotách 10 °C, 20 °C, 30 °C a 40 °C a souhrnně při teplotním spádu 10 °C. Také bylo měření prováděno na deskách, které byly kondicionovány v prostředí 23 °C a relativní vlhkosti 50 % a v prostředí 23 °C a relativní vlhkosti 80 %. Tím do sebe vzorky pojaly

určité procento vlhkosti, a tím se zvýšil součinitel tepelné vodivosti. Měření probíhalo za pomoci přístroje FOX 200. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách č. 4 a č. 5.

Naměřené hodnoty

Tabulka 4: Naměřené průměrné hodnoty součinitele tepelné vodivosti vysušených vzorků

OZNAČENÍ	$\lambda_{10\text{ °C}}$ [W/(m·K)]	$\lambda_{20\text{ °C}}$ [W/(m·K)]	$\lambda_{30\text{ °C}}$ [W/(m·K)]	$\lambda_{40\text{ °C}}$ [W/(m·K)]
VZOREK A	0,05641	0,05811	0,06005	0,06197
VZOREK B	0,05664	0,05840	0,06034	0,06238
REFERENČNÍ	0,08620	0,08705	0,08731	0,08753

Tabulka 5: Naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti v závislosti na vlhkosti vzorku

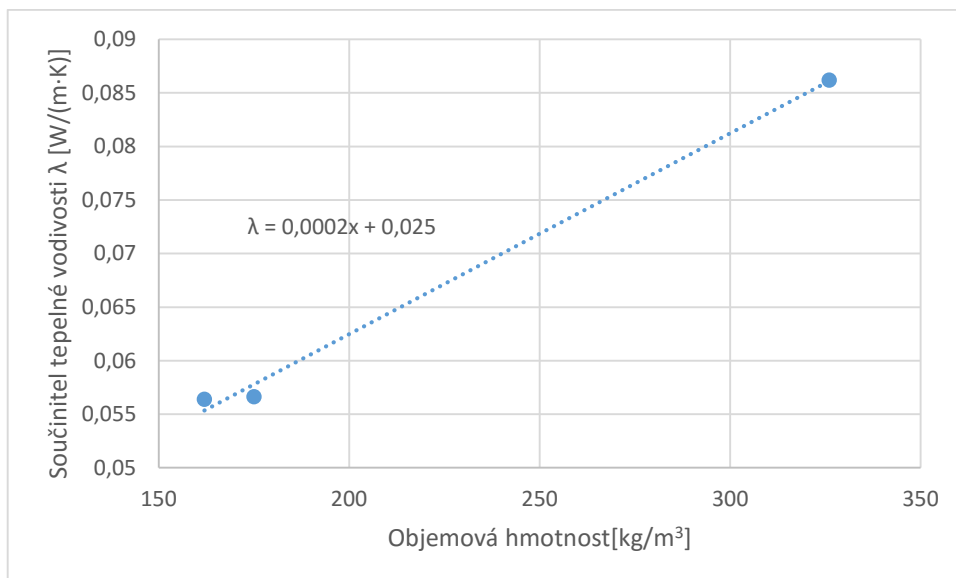
OZNAČENÍ	PROSTŘEDÍ	VLHKOST VZORKU [%]	$\lambda_{10\text{ °C}}$ [W/(m·K)]
VZOREK A	VYSUŠENÝ	0	0,05641
	(23 °C; 50 %)	0,06	0,05771
	(23 °C; 80 %)	1,61	0,05893
VZOREK B	VYSUŠENÝ	0	0,05664
	(23 °C; 50 %)	0,16	0,05818
	(23 °C; 80 %)	2,24	0,06126
REFERENČNÍ VZ.	VYSUŠENÝ	0	0,08620
	(23 °C; 50 %)	0,09	0,09069
	(23 °C; 80 %)	1,62	0,09516

Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti

Tepelná vodivost se u pórovitých materiálů zmenšuje poměrně lineárně s jejich objemovou hmotností, tj. se zvětšováním celkové pórovitosti. Toto tvrzení potvrzují naměřené hodnoty a z nich vytvořený graf. Pro stanovení závislosti tepelné vodivosti na objemové hmotnosti (viz. tabulka č.6) byly použity vysušené vzorky. Výsledkem tedy bude hodnota součinitele tepelné vodivosti λ_{dry} .

Tabulka 6: Naměřené průměrné hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ_{dry}

	OBJ. HMOTNOST [kg/m ³]	SOUČ. TEPEL. VODIVOSTI [W/(m·K)]
VZOREK A	162	0,05641
VZOREK B	175	0,05664
REFERENČNÍ VZ.	326	0,08620

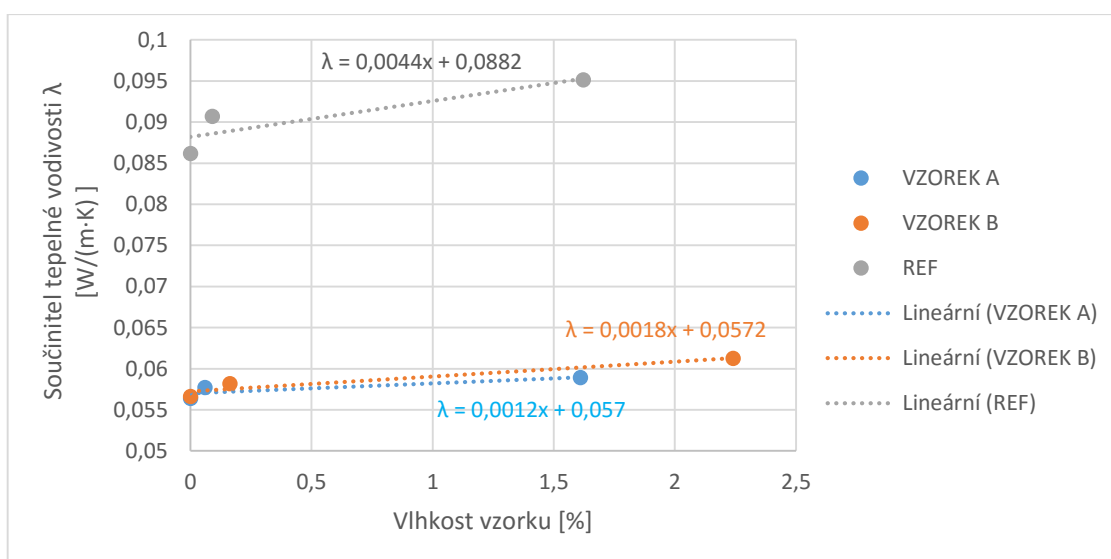


Graf 3: Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti pórobetonu

Křivka závislosti je téměř lineárního charakteru. VZOREK A i VZOREK B vykazuje téměř totožné hodnoty součinitele tepelné vodivosti. Tyto výsledky, znázorněné v grafu č. 3, jsou velmi příznivé a blíží se hodnotám běžných tepelných izolací. Při relativně nízké objemové hmotnosti, zároveň dostatečné pevnosti v tlaku, lze navrhnout obvodový nenosný plášť budovy s výbornými izolačními parametry.

Závislost tepelné vodivosti na vlhkosti

Vzorky, které byly umístěny po dobu zkoušení v klimakomorách, se zvážily a vypočítala se jejich rovnovážná sorpční vlhkost. Na základě toho lze sestavit graf závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti materiálu (viz. graf č. 4). Vliv vlhkosti na tuto problematiku je popsán v kapitole 4. 3.

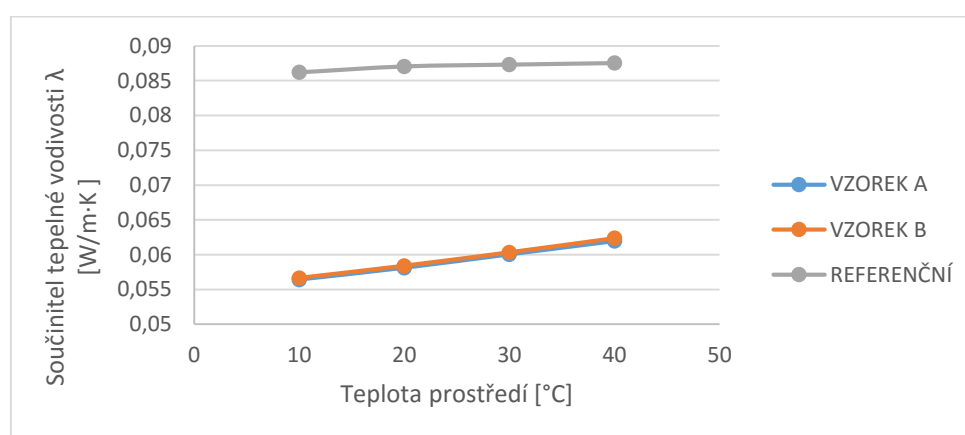


Graf 4: Závislost součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti materiálu

Měření prokázalo, že s vyšší vlhkostí roste hodnota součinitele tepelné vodivosti. Tato závislost je lineární. Chování obou měřených vzorků s objemovou hmotností do 200 kg/m^3 je srovnatelné. Sklon spojnice trendu je nízký a nárůst hodnoty součinitele tepelné vodivosti není nikterak velký. Při vlhkosti 2,24 % se hodnota λ zvýšila pouze o cca 8 %. Teoreticky vypočtená hodnota λ by dle rovnice regrese pro praktickou 6% vlhkost byla $0,065 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. U referenčního vzorku je sklon spojnice trendu větší, a proto vliv vlhkosti má vyšší váhu.

Pokud bude konstrukce ze zkoumaného tepelně-izolačního pórobetonového materiálu dostatečně chráněna proti vlhkosti, nebudou se vyskytovat problémy v souvislosti s tímto hlediskem.

Závislost tepelné vodivosti na teplotě



Graf 5: Závislost součinitele tepelné vodivosti na střední teplotě při měření

Jak lze vidět v grafu č. 5, pro VZOREK A i B je křivka lineární a téměř splývá. Se vzrůstající teplotou roste i součinitel tepelné vodivosti. Toto zjištění ukazuje, že materiál bude lépe izolovat v zimě a chladných měsících. V období vyšších teplot se vlastnosti mírně zhorší. Přehřívání konstrukce je u tohoto typu pórobetonu problém a zapříčiňuje i nepříjemné klima v tropických teplotách. Řešením by mohlo být použití např. slunolamů, které zabráni přímému slunečnímu záření na konstrukci, nebo aplikace vnějšího zavěšeného pláště. Ten by zaujímal estetickou funkci a zároveň stínící. Vzniklá mezera mezi pláštěm a pórobetonem by sloužila k cirkulaci vzduchu (blíže popsáno v kapitole 6.1).

Referenční vzorek z tvárnice má sklon křivky mírnější než u ostatních vzorků, ale charakter je podobný, tedy křivka je téměř lineární. S rostoucí střední teplotou hodnota součinitele tepelné vodivosti roste.

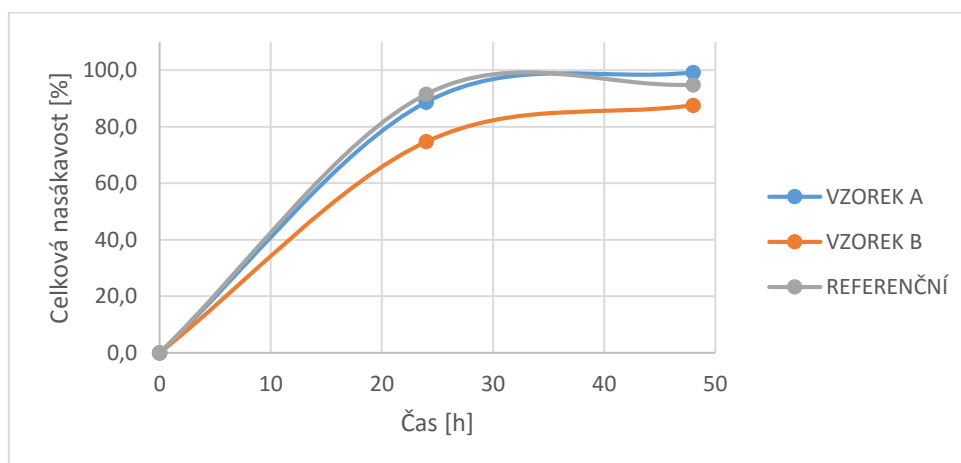
11.3 Vyhodnocení celkové krátkodobé nasákavosti

Póry v pórobetonu jsou uzavřeny jen zdánlivě a tím umožňují nasáknout vodu do materiálu. Nasákavost je u tohoto materiálu velkým problémem, ale na druhou stranu za stejný čas pojme méně vody, než pálený cihelný stěp. V tabulce č. 7 jsou uvedeny naměřené hodnoty.

Tabulka 7: Naměřené hodnoty nasákavosti

	m_s [g]	m_{24} [g]	m_{48} [g]	$w_{l,24}$ [%]	$w_{l,48}$ [%]
VZOREK A	182,8	344,9	364,2	88,7	99,2
VZOREK B	185,2	323,5	347,4	74,7	87,6
REFERENČNÍ	325,9	624,0	634,9	91,5	94,8

Jelikož je nasákavost funkcí času, je následně zobrazen graf této závislosti.



Graf 6: Závislost celkové nasákavosti na čase

Vzestup nasáklé vody je nejvyšší v období do 30 hodin. Po této fázi se obsah vody ustálí (viz. graf č. 6). Vidíme, že materiál dokáže pojmout velké množství vody a je nutno s tímto faktem počítat.

11.4 Vyhodnocení koeficientu kapilární absorpce

Koeficient kapilární absorpce byl stanoven pro dva zkušební materiály a pro jeden referenční. Také byla změřena výška vzlinutí vody. Pro znázornění závislosti absorpce na čase byl zhotoven graf č. 7.

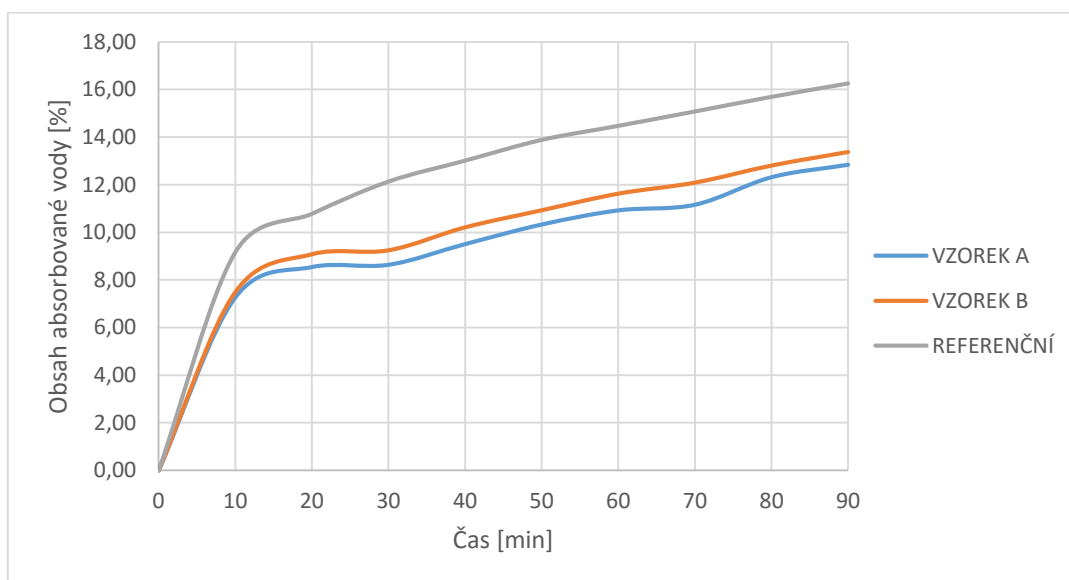
Tabulka 8: Koeficient kapilární absorpce a výška vzlinutí

Označení	VZOREK A	VZOREK B	REFERENČNÍ
C [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-0,5}$]	0,291	0,309	0,689
Vzlinutí [mm]	25,6	25,3	27,8

Nejvyšší hodnota koeficientu kapilární absorpce byla naměřena u referenčního vzorku, který má nižší obsah makropórů a vyšší obsah kapilár. VZOREK A i B vykazují zhruba poloviční hodnoty (viz. tabulka č. 8). Toto je způsobeno vyšším obsahem makropórů, které přerušují kapilární kanálky a omezují transport vody. U referenčního vzorku byla úroveň vzlinuté vody o cca 1,5 mm výše.



Obrázek 19: Průběh zkoušky

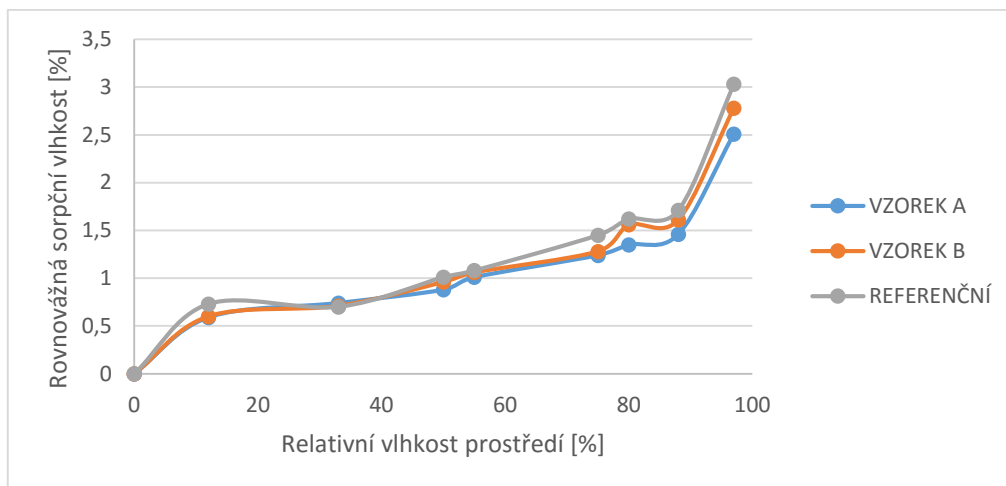


Graf 7: Závislost obsahu absorbované vody na čase

Referenční vzorek pojmul asi o 3 % více vlhkosti, než VZOREK A a B. Avšak charakter křivky je podobný, kdy ve fázi do 10. minuty je rychlost absorpce nejrychlejší.

11.5 Vyhodnocení rovnovážné sorpční vlhkosti

V následujícím grafu je znázorněna sorpční izoterma všech vzorků. Měření probíhalo do ustálení rovnovážné vlhkosti, což trvalo přibližně měsíc.



Graf 8: Sorpční izotermy pórobetonu

V prostředí s relativní vlhkostí 97 % vzorky pojmuly nejvíce vlhkosti. Avšak i tyto vlhkosti jsou velmi malé. Referenční vzorek měl po konečném vážení vlhkost lehce přes 3 %. VZOREK A obsahoval nejméně vlhkosti, a to 2,51 %. Charakter izoterem všech vzorků je podobný (lze vidět v grafu č. 8). Výsledkem tohoto měření je fakt, že má materiál malou vlhkostní citlivost. To znamená, že pokud se výrobek nedostane do přímého kontaktu s vodou, nebudou se výrazně zhoršovat jeho vlastnosti a nebudou vznikat problémy, spojené s vlhkostí.

11.6 Vyhodnocení tahové pevnosti podkladové vrstvy

Vzhledem k charakteru zkoušeného materiálu bylo zřejmé, že k porušení dojde přímo v materiálu a nikoliv v jiné části. Při přípravě zkušebních vzorků bylo nutno opatrně vyříznout čtverce kolem terčů, abychom neprořizli celý materiál.



Obrázek 20: Održená část a porušená oblast

Stanovený předpoklad byl splněn a lze vypočítat pevnost v tahu podkladové vrstvy.

Tabulka 9: Naměřené hodnoty pevností v tahu

	Pevnost v tahu [MPa]	Průměrná pevnost v tahu [MPa]
A-1	0,16	0,16
A-2	0,12	
A-3	0,19	
B-1	0,21	0,21
B-2	0,22	
B-3	0,21	
REF-1	0,37	0,41
REF-2	0,42	
REF-3	0,44	

Naměřené hodnoty, uvedené v tabulce č. 9, se nijak výrazně nevychylují v rámci vzorku a jasně jde vidět rozdíl u jednotlivých materiálů. Nejnižší hodnoty byly naměřeny u VZORKU A. Pevnější strukturu pak vykazoval VZOREK B, který měl pevnost v tahu o 0,05 MPa vyšší, než vzorek A. Dvakrát tak vyšší pevnost pak byla zjištěna na referenčním vzorku z pórobetonu P2-350, které se řadí do kategorie nosného zdiva.

D. ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala lehkým autoklávovaným pórobetonem na silikátové bázi s objemovou hmotností do 200 kg/m^3 . Tento materiál má největší potenciál v konstrukcích, které musí vykazovat dobré tepelně-izolační vlastnosti a nízké zatížení vlastní tíhou. Předpokládána je i nižší cena hotového výrobku oproti MULTIPORU. Jeho výroba je komplikovaná z důvodu jeho vysoké vlhkosti (cca 50 %) po opuštění autoklávu. Tato vlhkost navíc v běžných podmínkách odchází z materiálu velmi pomalu, proto před expedicí je nutné výrobek vysušovat komplikovanou cestou. To se poté projeví na ceně.

Již vizuální pohled na vzorek dával první informaci o vlastnostech. Celý blok (cca $250 \times 250 \times 600 \text{ mm}$) se při manipulaci nijak nepoškozoval a při drobných nárazech se nerozpadal. Výrobek je snadno opracovatelný a snadno se z něj připravovaly vzorky. Drobná obtíž se pak projevila ve formě odpadajícího prachu. Křehkost materiálu se projevila pouze při aplikaci subtilních desek do přístroje na měření tepelné vodivosti. V praktické části bylo sledováno několik parametrů výrobku. Průměrná objemová hmotnost ve vysušeném stavu VZORKU A a VZORKU B byla 162 kg/m^3 resp. 175 kg/m^3 . Tyto hodnoty ukazují, že aplikace výrobků do konstrukce nebude komplikovaná a manipulace s nimi bude snadná. Ihned po vyjmutí ze sušárny byly VZOREK A i VZOREK B na dotyk méně horké, než REFERENČNÍ VZOREK z P2-350. Z tohoto senzorického zjištění lze usoudit, že má výrobek malou akumulaci tepla. Nízká objemová hmotnost souvisí s naměřenými pevnostmi v tlaku. Hodnota $0,82 \text{ MPa}$ (pro VZOREK A) a hodnota $0,84 \text{ MPa}$ (pro VZOREK B) odpovídá takto nízké objemové hmotnosti. Tyto pevnosti umožňují použít výrobek do samonosných předstěn či do podlah. Naměřená hodnota tepelné vodivosti ($\lambda_{10, \text{dry}} = 0,056 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) řadí výrobek do kategorie tepelných izolací. Nízká objemová hmotnost spolu s poměrně nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti umožňuje vytvořit tenké izolační lehké pláště. Koeficient kapilární absorpce $C [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-0,5}]$ byl naměřen pro VZOREK A $0,291 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-0,5}$, pro VZOREK B $0,309 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-0,5}$ a pro REFERENČNÍ VZOREK byla naměřena hodnota kapilární absorpce $0,689 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-0,5}$. Pokud bude správně provedena hydroizolace v oblasti soklu, nebude kapalná vlhkost způsobovat problémy. Poslední sledovanou vlastností byla tahová pevnost podkladu. Podklad u VZORKU A se porušil při dosažení hodnoty $0,16 \text{ MPa}$. Vyšší hodnoty dosáhl VZOREK B, a to $0,21 \text{ MPa}$. Logicky nejpevnější materiál byl REFERENČNÍ, který má nižší obsah pórů a hutnější matici. Pevnost v tahu ($0,41 \text{ MPa}$) byla téměř dvojnásobná oproti VZORKU B.

Povaha výrobku koresponduje se zdícím prvkem, tudíž jeho aplikace vyloučí kotvení k nosné konstrukci. Využití zmíněných vlastností směřuje k izolačním předstěnám. Výhodou tohoto materiálu je nízká vlhkostní citlivost. To znamená, že při vystavení výrobku vzdušné vlhkosti tuto snadno neabsorbuje a výrobek nenavlhá. Je to způsobeno zvýšenou pórovitostí a povahou pórů. Proto odpadá již zmíněné komplikované sušení a cena výrobku by mohla být nižší, než například u MULTIPORU či konkurenčních výrobků. V zásadě existují dvě možnosti, jak výrobek aplikovat jako izolační předstěnu. První variantou je vyzdít druhou stěnu přímo před nosnou konstrukci, opatřenou vhodnou povrchovou úpravou. Samotná izolace by z vnější strany měla být omítnuta speciální hydrofobní omítkou. Ta by zajišťovala konstantní vlhkost výrobku a s tím spojené konstantní izolační schopnosti. Také musí být omítko

paropropustná, aby se případná vlhkost v systému mohla odpařovat do prostředí. Celkový tepelný odpor konstrukce by se pak skládal z jednotlivých tepelných odporů vrstev. Tloušťka izolační vrstvy se spočítá na základě požadavku celkového součinitele prostupu tepla pro konstrukci. Pro bližší představu je uvedena teoretická konstrukce se složením, aby hodnota součinitele prostupu tepla splňovala kritérium pro pasivní domy ($U = 0,18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$). Klimatická oblast Brno (návrhová vnější teplota v zimě $-5 \text{ }^\circ\text{C}$), návrhová vnitřní teplota $21 \text{ }^\circ\text{C}$.

		Tepelný odpor při přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce R_{si}		0.13	$\text{m}^2\text{K/W}$	$\theta_0 = 19.82 \text{ }^\circ\text{C}$?
interiér ↓ exteriér	j	Materiál	$d \text{ [m]}$	$\lambda_a \text{ [W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}]$	$R_j \text{ [m}^2\text{K/W]}$	$\theta_j \text{ [}^\circ\text{C]}$	
	1	<input checked="" type="checkbox"/> Omítka vápenná	0,015	0,88	0.017	19.71	↓
	2	<input checked="" type="checkbox"/> YTONG P2-350 Ytong Lambda+	0,25	0,089	2.809	2.77	↑ ↓
	3	<input checked="" type="checkbox"/> YTONG předstěna	0,15	0,056	2.679	-13.39	↑ ↓
	4	<input checked="" type="checkbox"/> Omítka perlitová	0,015	0,11	0.136	-14.22	↑
		Tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce R_{se}		0.13	$\text{m}^2\text{K/W}$	$\theta_e = -15 \text{ }^\circ\text{C}$	

Obrázek 21: Příklad konstrukce s využitím izolační předstěny [37]

Součinitel prostupu tepla pro tuto konstrukci je $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Plošné zatížení této konstrukce by pak bylo přibližně pouze 115 kg/m^2 .

Druhá varianta počítá se vzduchovou mezerou mezi nosnou konstrukcí a izolační předstěnou. Vzduchová mezera by sloužila jako sanační vrstva při odstraňování vlhkosti ze zdiva. Cirkulace vzduchu může být také vytvořena pomocí ventilačních kanálů (kapitola 6.1.2). Abychom zabránili přehřívání konstrukce při extrémně vysokých teplotách, můžeme použít zavěšený obkladový systém nebo slunolamy.

Naměřené hodnoty pevností v tlaku ukázaly, že lze výrobek uplatnit při zateplování základových desek a suterénních stěn z vnější strany. Při těchto aplikacích jsou pro pórobetonovou izolaci konkurencí desky z pěnového skla. Existuje několik typů desek pro různé aplikace a s různými vlastnostmi. Pro porovnání byla vybrána deska FOAMGLAS® FLOOR BOARD T4+. Ta má nižší součinitel tepelné vodivosti ($0,041 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) při objemové hmotnosti 115 kg/m^3 a pevnosti nad $0,6 \text{ MPa}$. Výhodnější vlastnosti jsou vykoupeny vysokou cenou výrobku.

Spojení ultravysokohodnotného betonu s pórobetonem vytváří relativně lehký kompozitní systém s vysokými pevnostmi a užitnými vlastnostmi. Rám z UHPC zajistí nosnou funkci a jádro z AAC pak tepelně-izolační. Tento kompozit sníží zatížení na vodorovnou nosnou konstrukci, a tím nepřímo sníží spotřebu materiálu.

Ve skeletových konstrukcích by mohl být výrobek využit jako izolační výplň. Výhodnou aplikací je pak vytvoření nosného závěsného systému například z panelů HEBEL, na který by byl výrobek vyžděn. Tímto řešením by se zamezilo úniku tepla přes vodorovné konstrukce.

Pokud bychom chtěli použít výrobek jako tepelnou izolaci do vodorovných konstrukcí, musela by být tato buď masivní konstrukce, nebo by muselo být použito akustického podhledu.

Právě horší akusticky izolační vlastnosti lehkého pórobetonu omezují jeho použití v těchto konstrukcích.

Z celkového hlediska se jeví materiál jako slibný pro výrobu tepelně-izolačního nenosného zdiva. Předmětem dalšího zkoumání do budoucna by mohla být otázka křehkosti výrobku. Úpravou receptury a parametrů výroby by se snížila zmetkovitost a poničení prvků při manipulaci.

E. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSÚ, Sčítání lidu z 26.3.2011 [online]. [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=vystup-objekt-yhledavani&evo=_!_OT--117-L1&str=&zo=N&pvo=OTCR117&pvoch=&vyhltext=st%C3%A1%C5%99%C3%AD%20dom%C5%AF&udIdent=&verze=1&nahled=N&sp=N&nuid=&zs=&skupId=&pvokc=&filtr=G~F_M~F_Z~F_R~F_P~_S~_null_null_&katalog=30809&z=T
- [2] DROCHYTKA, R., J. ZACH, A. KORJENIC a J. HROUDOVÁ. Improving the energy efficiency in buildings while reducing the waste using autoclaved aerated concrete made from power industry waste: Computational analysis aimed at increasing service life. *Energy and Buildings*. 2012, **47**, 84-90. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.10.029. ISBN 10.1016/j.enbuild.2012.10.029. ISSN 03787788. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778812005385>
- [3] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU energetické náročnosti budov - Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), 2010
- [4] *Pórobeton Ytong* [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.ytong.cz/porobeton-ytong.php>
- [5] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 268/2009 Sb. ze dne 12. srpna 2009 o technických požadavcích na stavby. In: Sbírka zákonů České republiky. 2009, částka 81, s. 3702 – 3719. Dostupné také z: <http://portal.gov.cz/app/zakony/zakonPar.jsp?idBiblio=69147&fulltext=&nr=268~2F2009&part=&name=&rpp=15>. ISSN 1211-1244. Ve znění k 22. 5. 2012.
- [6] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 406/2000 Sb. ze dne 25. října 2000 o hospodaření s energií. In: Sbírka zákonů České republiky. 2000, částka 115, s. 5314 – 5319. Dostupné také z: <http://portal.gov.cz/app/zakony/zakon.jsp?page=0&fulltext=&nr=406~2F2000&part=&name=&rpp=15>. Ve znění k 22. 5. 2012.
- [7] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 148/2007 Sb. ze dne 18. června 2007 o energetické náročnosti budov. In: Sbírka zákonů České republiky. 2007, částka 53, s. 1855 – 1879. Dostupné také z: <http://portal.gov.cz/app/zakony/zakonInfo.jsp?idBiblio=64901&fulltext=&nr=148~2F2007&part=&name=&rpp=15>. Ve znění k 22. 5. 2012.
- [8] ČSN 73 0540-2. Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví, 2011.
- [9] CHMÚRNÝ, I. *Tepelná ochrana budov*. Bratislava: Jaga group, 2003. 80-8890527-3.
- [10] ŠÁLA, J., a další, a další. *Tepelná ochrana budov- komentář k ČSN 73 0540*, 2007.
- [11] [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/prostup-tepla-stavebni-konstrukci/312-tepelny-odpor-r>
- [12] ČSN 73 0540 -1. Tepelná ochrana budov - část 1: Terminologie. Praha: ČNI, 2005.
- [13] HEJHÁLEK, J. [online]. [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/tepelne-izolace-cast-i/>
- [14] NEUWIRTHOVÁ, P. *Energetická optimalizace obalových konstrukcí*. 1. vyd. Praha: Česká energetická agentura, 1998
- [15] *MATERIÁLY PRO TEPELNÉ IZOLACE* [online]. Katedra stavebních materiálů a chemie [cit. 2016-04-29]. Dostupné z : [http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/IZMA/prednaskaVIII_IZMA\(1\).pdf](http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/IZMA/prednaskaVIII_IZMA(1).pdf)
- [16] *Přednosti vnitřního a venkovního zateplení* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1840-prednosti-vnitriho-a-venkovniho-zatepleni>
- [17] VÝBORNÝ, J. *Nauka o materiálech 20 (21): pórobeton*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 8001020630.

- [18] DROCHYTKA, R. *Lehké stavební látky*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1993. Učební texty vysokých škol. ISBN 8021405147.
- [19] FLEISCHACKER, J. *Porovnání mikrostruktury standardního a modifikovaného popílkového pórobetonu*. Brno, 2014. 60 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
- [20] MACHALA, D. *Návrh skladby ETICS využívající izolační jádro z pórobetonu*. Brno, 2011. 64 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc..
- [21] MATOUŠEK M., *Lehké stavební látky – díl III*, páte nezměněné vydání Brno: VUT, 1987, 96 s.
- [22] NARAYANAN, N., K. RAMAMURTHY, L. KARVONEN, P. SCHNEUWLIN a F. WINNEFELD. *Structure and properties of aerated concrete: a review* [online]. [cit. 2016-04-12]. DOI: 10.1016/S0958-9465(00)00016-0. ISBN 10.1016/S0958-9465(00)00016-0. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946500000160>
- [23] ČSN EN 679. Stanovení pevnosti v tlaku autoklávovaného pórobetonu. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [24] KOUTNÝ, O. *Příprava pórobetonu pro tepelně izolační účely*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2014. 84 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.
- [25] KOČÍ, V., J. MADĚRA a R. ČERNÝ. Exterior thermal insulation systems for AAC building envelopes: Computational analysis aimed at increasing service life. *Energy and Buildings*. 2012, **47**, 84-90. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.11.030. ISSN 03787788. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778811005767>
- [26] *Kotvení tepelných izolací* [online]. In: . [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.tepelna-izolace.cz/jak-spravne-kotvit-izolaci-na-obvodovou-stenu.html>
- [27] NIZOVITSEV, M.I., V.T. BELYI a A.N. STERLYGOV. *The facade system with ventilated channels for thermal insulation of newly constructed and renovated buildings* [online]. [cit. 2016-05-15]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.02.003. ISBN 10.1016/j.enbuild.2014.02.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778814000978>
- [28] SANJUAN, C., M. J. SUÁREZ, M. GONZÁLEZ, J. PISTONO a E. BLANCO. *Energy performance of an open-joint ventilated façade compared with a conventional sealed cavity façade* [online]. [cit. 2016-05-15]. DOI: 10.1016/j.solener.2011.04.028. ISBN 10.1016/j.solener.2011.04.028. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X11001484>
- [29] MICCOLI, L., P. FONTANA, N. SILVA, A. KLINGE, Ch. CEDERQVIST, O. KREFT, D. QVAESCHNING a Christer SJÖSTRÖM. [online]. [cit. 2016-05-07]. DOI: 10.3233/FDE-150029.
- [30] *Vienna Point Brno* [online]. In: . [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://marketing.xella.cz/napsali/2008/Stavebnictvi-a-Interier_c3-2008_VienaPoint.pdf
- [31] YARDIM, Y., A.M.T. WALEED, M. S. JAAFAR a S. LASEIMA. AAC-concrete light weight precast composite floor slab. *Construction and Building Materials* [online]. 2013, 40, 405-410 [cit. 2016-05-08]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.10.011. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061812007945>
- [32] ČSN EN 678. Stanovení objemové hmotnosti v suchém stavu autoklávovaného pórobetonu
- [33] ČSN EN 679. Stanovení pevnosti v tlaku autoklávovaného pórobetonu
- [34] RUMEL, I. *Vývoj pokročilých zdicích materiálů s integrovanou tepelnou izolací*. Brno, 2012. 87 s., 14 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Jiří Zach, Ph.D.
- [35] ŠTASTNÍK, S., ZACH, J. *Zkoušení izolačních materiálů*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 95 s. ISBN 80-214-2253-X.

- [36] *Přístroj na měření součinitele tepelné vodivosti* [online]. In: . [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <http://www.tainstruments.com/?s=FOX+200>
- [37] *Výpočet prostupu tepla* [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/140-prostup-tepla-vicevrstvou-konstrukci-a-prubeh-teplot-v-konstrukci>

F. SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Průběh teplot v konstrukci [16]	16
Obrázek 2: Rozpustnost $\text{Ca}(\text{OH})_2$, β -křemene a amorfního SiO_2 ve vodě [18]	19
Obrázek 3: Rovnice vzniku tobermoritu [18]	20
Obrázek 4: Uspořádání vrstev zkoušeného systému [25]	26
Obrázek 5: Příklad fasádního systému [27]	27
Obrázek 6: Skica odvětrávané fasády [28]	28
Obrázek 7: Fasádní panely z UHPC/AAC kompozitu [29]	29
Obrázek 8: Pohledy a řez UHPC/AAC panelu [29]	30
Obrázek 9: Bytový dům v Uherském Hradišti	32
Obrázek 10: Zavěšený fasádní systém při stavbě Vienna Point [30]	33
Obrázek 11: Příklad spřaženého kompozitního systému [31]	34
Obrázek 12: Příklad zateplení základové desky	35
Obrázek 13: Příklad zateplení suterénní zdi	35
Obrázek 14: Chráněná teplá deska [35]	40
Obrázek 15: Měřidlo tepelného toku [35]	41
Obrázek 16: Přístroj FOX 200 [36]	42
Obrázek 17: Dvousložkové lepidlo SIKADUR [®] (vlevo) a příprava zkušebních vzorků (vpravo)	44
Obrázek 18: Pórovitá struktura VZORKU A	46
Obrázek 19: Průběh zkoušky	52
Obrázek 20: Održená část a porušená oblast	53
Obrázek 21: Příklad konstrukce s využitím izolační předstěny [37]	56

G. SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Objemové hmotnosti materiálů.....	45
Graf 2: Závislost pevnosti v tlaku na objemové hmotnosti.....	47
Graf 3: Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti pórobetonu	49
Graf 4: Závislost součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti materiálu	49
Graf 5: Závislost součinitele tepelné vodivosti na střední teplotě při měření	50
Graf 6: Závislost celkové nasákavosti na čase	51
Graf 7: Závislost obsahu absorbované vody na čase.....	52
Graf 8: Sorpční izotermy pórobetonu.....	53

H. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přehled izolačních materiálů používaných pro kontaktní zateplovací systémy	37
Tabulka 2: Tabulka relativních vlhkostí vzduchu	44
Tabulka 3: Naměřené hodnoty pevností v tlaku	47
Tabulka 4: Naměřené průměrné hodnoty součinitele tepelné vodivosti vysušených vzorků ..	48
Tabulka 5: Naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti v závislosti na vlhkosti vzorku.	48
Tabulka 6: Naměřené průměrné hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ_{dry}	48
Tabulka 7: Naměřené hodnoty nasákavosti	51
Tabulka 8: Koeficient kapilární absorpce a výška vzlinutí	51
Tabulka 9: Naměřené hodnoty pevností v tahu	54

I. POUŽITÉ ZKRATKY

AAC	autoklávovaný pórobeton
ČSN	česká státní norma
EN	evropská norma
UHPC	ultravysokohodnotný beton
CLC	lehký buňkový beton
ETICS	externí tepelně izolační kontaktní systém
OJVF	otevřený plášť odvětrávaných fasád
SCM	doplňkové cementové materiály
MMR	ministerstvo pro místní rozvoj